АМ и РС

Автоматические манипуляторы и робототехнические системы

Промышленные роботы для миниатюрных изделий

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

АМ и РС

Автоматические манипуляторы и робото-технические системы

Под общей редакцией
члена-корреспондента АН СССР
Е.П. ПОПОВА

Редакционная коллегия:
Е.П.Попов (председатель), П.Н.Белянин (заместитель председателя),
М.С.Елисеев, В.В.Клюев, Ю.Г.Козырев,
И.М.Макаров (заместитель председателя), А.Г.Сазонов, А.М.Титов,
В.А.Чиганов, Я.А.Шифрин, Е.И.Юревич,
А.Е.Дубин (ученый секретарь)

~~ББК 32.816~~
С34
УДК 621.865.8

В. Б. Брагин, Ю. Г. Войлов, Ю. Д. Жаботинский, С. Л. Зенкевич,
С. С. Камынин, А. А. Кирильченко, В. В. Клюев, Ю. А. Кондратьев,
В. И. Костюк, А. А. Краснопрошина, Э. С. Лямина-Карели,
В. В. Маслов, А. В. Назарова, Д. Е. Охоцимский, В. А. Панков,
Г. В. Письменный, Е. П. Попов, В. Е. Пряничников, Ю. И. Рассадкин,
К. В. Самвелян, Н. О. Собкевич, А. В. Тимофеев, В. А. Тимченко

С34 **Системы** очувствления и адаптивные промышленные роботы/В. Б. Брагин, Ю. Г. Войлов, Ю. Д. Жаботинский и др.; Под общ. ред. Е. П. Попова, В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1985. — 256 с., ил. — (Автоматические манипуляторы и робототехнические системы).

В пер.: 1 р. 20 к.

Описаны системы очувствления и построенные на их основе адаптивные промышленные роботы. Рассмотрены условия формирования моделей проблемно-ориентировочных средств, а также принципы построения систем распознавания адаптивных роботов. Приведены сведения о датчиках локации, внутренней информации, систем технического зрения, силомоментного и тактильного очувствления. Дана информация о системах управления адаптивных промышленных роботов и их программном обеспечении.

Основное внимание уделено адаптивным промышленным роботам для различных технологических процессов: сварки, сборки, производства радиоэлектронной аппаратуры, механической обработки, штамповки, контроля качества.

Приведены примеры практической реализации и указаны перспективы развития адаптивных промышленных роботов и их систем очувствления.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся вопросами автоматизации и роботизации производства.

С $\frac{2404000000\text{-}20}{038\ (01)\text{-}85}$ 20-85

ББК 32.816
6Ф0.1

© Издательство «Машиностроение», 1985 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 7

Глава 1. **Принципы построения адаптивных промышленных роботов** . . 9

1.1. Архитектура адаптивных робототехнических систем . . . 9
1.2. Принципы восприятия, обработки информации и управления 13
1.3. Модели проблемно-ориентированной среды 22

Глава 2. **Датчики силомоментного и тактильного очувствления** 29

2.1. Принципы измерения сил в силомоментных и тактильных датчиках адаптивных роботов 29
2.2. Многокомпонентные датчики силомоментного очувствления 35
2.3. Датчики тактильного очувствления 48

Глава 3. **Локационные датчики адаптивных промышленных роботов** . . 56

3.1. Классификация локационных датчиков 56
3.2. Акустические локационные датчики 58
3.3. Оптические локационные датчики 64
3.4. Электромагнитные локационные датчики 70
3.5. Радиационные локационные датчики 76
3.6. Пневматические локационные датчики 78

Глава 4. **Системы технического зрении** 81

4.1. Основные принципы и способы построения систем технического зрения 81
4.2. Видеодатчики систем технического зрения. 89
4.3. Телевизионные системы технического зрения. 95
4.4. Системы технического зрения для экстремальных условий 98
4.5. Алгоритмы обработки изображений 102

Глава 5. **Системы управления адаптивных промышленных роботов и их программное обеспечение** 121

5.1. Принципы построения систем управления адаптивных роботов 121
5.2. Программное обеспечение систем управления адаптивных роботов 125
5.3. Логическое управление адаптивными роботами 143
5.4. Инструментальные средства для разработки и исследования алгоритмического и программного обеспечения адаптивных роботов 162

Глава 6. **Адаптивные промышленные роботы для дуговой сварки** 173

6.1. Особенности сварочных роботов 173
6.2. Методы адаптации промышленных роботов для дуговой сварки 176
6.3. Технические средства адаптации промышленных роботов для дуговой сварки 182

Глава 7. **Сборочные адаптивные промышленные роботы** 193

7.1. Сборочное технологическое оборудование для производства радиоэлектронной аппаратуры 193
7.2. Сборочные роботы с силомоментным очувствлением . . . 200
7.3. Пример робототехнической системы для многооперационной сборки 205

Глава 8. **Адаптивные промышленные роботы для вспомогательных операций** 214
8.1. Адаптивные роботы для участков механической обработки 214
8.2. Адаптивные роботы для участков штамповки 217
8.3. Адаптивные роботы для адресования деталей на конвейере 223
8.4. Контрольно-измерительные роботы 230

Глава 9. **Перспективы развития адаптивных роботов и их систем очувствления** 241
9.1. Адаптивный робот как основной элемент гибкого автоматизированного производства 241
9.2. Развитие систем очувствления и управления 243
9.3. Развитие искусственного интеллекта роботов 246

Список литературы 249

Предметный указатель 252

ПРЕДИСЛОВИЕ

Адаптивные промышленные роботы (ПР) представляют собой новую ступень развития робототехники, для которой характерно создание гибкопрограммируемых устройств, оснащенных средствами очувствления для получения информации об окружающей среде, предмете производства и состоянии механизмов робота. Адаптивные роботы предназначены для работы в условиях с заранее неизвестными изменениями окружающей среды, к которым они должны приспосабливаться. На пути развития адаптивных ПР много емких научных, технических и организационных проблем, связанных с созданием широкой номенклатуры специализированных датчиков и устройств для исследования и отображения окружающей среды, микропроцессорных систем обработки получаемой информации и ее использования для управления работой роботов, программирования процессов восприятия и реакции на получаемую информацию в реальном масштабе времени, повышением надежности и долговечности ПР, улучшением метрологических его характеристик и т. д.

Для придания роботу новых качеств нужно, чтобы он обладал способностью к мгновенному восприятию внешней среды и мог использовать ее для автоматического формирования сигналов управления движением своих манипуляторов с целью выполнения заложенной в его память технологической задачи.

Адаптивный робот является принципиально новой производственной машиной с большими возможностями. К числу основных функций, выполняемых адаптивными роботами, относятся функции, свойственные человеку в процессе его трудовой деятельности, а именно: восприятие внешней среды с помощью «органов чувств» (технические средства очувствления), «обдумывание» и принятие решения (микропроцессорная обработка информации), активное воздействие на внешнюю среду «руками» (манипуляторами).

Многообразие автоматизируемых технологических процессов определяет весьма большое число параметров, подлежащих измерению в процессе работы адаптивного робота. К основным параметрам относятся линейные и угловые перемещения механизмов робота, возникающие в них силы и моменты, расстояние между захватом робота и объектом, положение и скорость движения захвата, признаки наличия, размеры, температура, форма, цвет деталей и др. В ка-

честве дополнительных параметров измерения могут быть зазоры, перекосы, проскальзывания, наличие внутренних дефектов, толщина материала или покрытия, твердость, напряжения, площадь, ориентация относительно реперной точки или осей и многие другие.

Применение элементов адаптации требуется для всех типовых технологических операций, таких, как окрасочные, сварочные, штамповка, механическая обработка, контроль качества, транспортировка, сборка и др. Актуальность адаптации существенно возрастает при усложнении и удорожании объекта производства, при работе в агрессивных средах, а также при воздействии различных влияющих факторов — механических и климатических нагрузок, биологических и специальных сред, ионизирующих и электромагнитных излучений.

Развитие адаптивных ПР обусловило создание многочисленных датчиков силомоментного и тактильного очувствления, внутренней информации о параметрах и состоянии манипулятора, систем технического зрения, локационных дальномеров и др. Существенную модернизацию в последнее время получили системы управления адаптивных ПР.

Обобщение подобного материала с иллюстрацией практического опыта применения и конкретных конструкций адаптивных ПР представляет несомненный интерес на данном этапе бурного развития автоматизации производства.

Большое внимание в книге уделено системам датчиков, которые должны функционировать на многих технологических операциях гибких автоматизированных производств и обеспечивать исходную информацию для правильной эксплуатации автоматического оборудования. Широкое использование в адаптивных ПР микропроцессоров, микро- и мини-ЭВМ для обработки информации и управления потребовало освещения в книге соответствующего материала по применяемым при роботизации элементам вычислительной техники.

Цель настоящей книги — раскрыть современное состояние разработок и дать кратко перспективы развития адаптивных роботов.

Книгу написали: В. Б. Брагин (гл. 1), Ю. Г. Войлов (гл. 1, 5), Ю. Д. Жаботинский (гл. 1, 6), С. Л. Зенкевич (гл. 1, 5), С. С. Камынин (гл. 7), А. А. Кирильченко (гл. 3, 4, 5), В. В. Клюев (предисловие, гл. 3, 4, 8, 9), Ю. А. Кондратьев (гл. 3), В. И. Костюк (гл. 1), А. А. Краснопрошина (гл. 5, 7), Э. С. Лямина-Карели (гл. 4), В. В. Маслов (гл. 4), А. В. Назарова (гл. 5), Д. Е. Охоцимский (гл. 7), В. А. Панков (гл. 4), Г. В. Письменный (гл. 2, 7), Е. П. Попов (гл. 2, 7, 9), В. Е. Пряничников (гл. 3, 4, 5), Ю. И. Рассадкин (гл. 4), К. В. Самвелян (гл. 6, 9), Н. О. Собкевич (гл. 7), А. В. Тимофеев (гл. 1, 8), В. А. Тимченко (гл. 6).

Глава 1

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

1.1. Архитектура адаптивных робототехнических систем

Автоматизация различных технологических процессов на современном производстве с помощью роботов может осуществляться двумя путями. Первый из них характерен для тех отраслей промышленности, которые отличаются высоким уровнем упорядоченности рабочих участков, оснащенных роботами. В этом случае допустимо априорное задание всех управляемых координат робота, подробное описание параметров внешнего оборудования и динамики их изменения во времени. Опираясь на указанные данные, можно составить математическую модель технологического процесса и организовать управление роботами. Обычно на таких производствах используются промышленные роботы с цикловой системой управления, надежно функционирующие при малых случайных изменениях различных возмущающих факторов, например, таких, как точностные параметры самого робота или внешнего технологического оборудования, т. е. роботы 1-го поколения с жесткой или частично перенастраиваемой программой.

Роботы 1-го поколения используются в основном в машиностроительных отраслях промышленности для обслуживания различного технологического оборудования, на операциях термообработки металлов, литья под давлением, в окрасочном, сварочном, кузнечно-прессовом и гибочном производствах. Эти роботы требуют высокой организации производства в части упорядочения среды, в которой они функционируют. Часто, однако, такое упорядочение стóит весьма дорого и связано с большими дополнительными затратами по разработке, созданию и внедрению специального оборудования, приспособлений, что является весьма неэффективным, особенно в тех условиях, когда требуется быстрая переналадка производства на выпуск нового изделия.

Вторым путем решения этой важнейшей народнохозяйственной задачи является внедрение гибких автоматизированных производств (ГАП), одним из основных элементов которых является адаптивный робот.

Адаптивная техническая система — это система, которая сохраняет работоспособность при непредвиденных изменениях свойств управляемого объекта, цели управления или окружающей среды путем изменения алгоритма функционирования. Таким образом, поведение адаптивного робота как технической системы должно быть

построено на основе сформулированного задания с учетом изменения свойств окружающей среды.

Роботы 2-го и 3-го поколений являются адаптивными, однако уровень адаптации у роботов 3-го поколения выше, и их принято называть роботами с искусственным интеллектом, тогда как роботы 2-го поколения — просто адаптивными роботами. Таким образом, адаптивный робот 2-го поколения занимает промежуточное положение между программным роботом и роботом с искусственным интеллектом. Так, у программного робота, полностью лишенного информации о состоянии среды, в которой он функционирует, адаптация отсутствует, а адаптивный промышленный робот, т. е. робот, снабженный системой очувствления, может успешно функционировать только в той среде, изменения которой можно заранее предвидеть.

Недетерминированность внешней среды учитывается путем обработки поступающей информации и соответствующей корректировки поведения (чаще всего — движения) робота. Здесь важно подчеркнуть тот факт, что вид и значения отклонений параметров внешней среды на этапе исполнения задания, сформулированного роботу человеком-оператором, были им (оператором) учтены заранее. Так, для адаптивных роботов, снабженных системой технического зрения, эта недетерминированность может быть связана с положением и ориентацией детали, которую роботу необходимо взять. Если же деталь, расположенная в поле зрения видеодатчика, перевернута либо вообще не принадлежит к классу тех деталей, с которыми работает робот, то система очувствления, запрограммированная только на вычисление указанных выше параметров, не заметит этого. Безусловно, можно улучшить алгоритмы обработки зрительной информации (если это доступно для оператора), однако и в этом случае может возникнуть ситуация, столкнувшись с которой, робот не будет в состоянии продолжать функционирование.

В отличие от адаптивного, робот с искусственным интеллектом не снабжен различного рода предписаниями поведения в тех или иных случаях: он их вырабатывает сам в процессе исполнения задания. Это достигается не за счет усложнения системы очувствления (она может и не отличаться от системы адаптивного робота), но за счет придания интеллектному роботу более мощных механизмов обработки поступающей информации и планирования поведения.

На самом деле нет четкой границы между перечисленными выше тремя поколениями роботов: даже программный робот, снабженный манипулятором с сервоприводами, является адаптивным в том смысле, что его система управления приводами, построенная по принципу обратной связи, способна парировать некоторые возмущения, возникающие в процессе движения исполнительного механизма (например, переменные моменты инерции звеньев, различные массы грузов в захвате и т. д.), при этом такая компонента адаптивного робота, как система очувствления, представлена здесь датчиками положения (и, возможно, скорости), установленными в подвижных сочленениях. Ясно, что в этом случае реализуется адаптация самого низкого уровня.

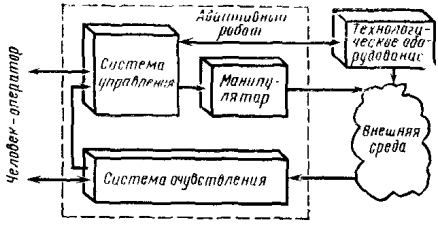


Рис. 1.1. Общая схема адаптивного робота

Успех в создании роботов последующих поколений во многом зависит от решения двух центральных проблем: очувствления манипуляторов и интеллектуализации управления. Решение этих проблем требует создания систем очувствления и адекватных систем управления, способных учитывать полученную информацию о внешней среде как в процессе планирования действий робота, так и в процессе исполнения.

Наиболее перспективными областями внедрения адаптивных ПР являются механическая сборка, дуговая и газовая сварка, кислородная резка, абразивная зачистка и шлифование, окраска распылением, операции упаковки, установка и съем деталей с конвейера, операции распознавания, сортировка деталей, разбор деталей из навала, контроль качества с помощью манипуляторов, оснащенных измерительной аппаратурой, и ряд других технологических операций.

Адаптивный робот представляет собой техническую систему, в состав которой входят, как правило, следующие компоненты: исполнительный механизм (манипулятор,) система очувствления и система управления (рис. 1.1).

Система очувствления воспринимает с помощью имеющихся в ее составе датчиков информацию о состоянии внешней среды, обрабатывает ее. В результате вырабатываются сигналы воздействия, поступающие на один из входов системы управления, которая в свою очередь вырабатывает соответствующие сигналы на манипулятор и технологическое оборудование. Робот совершает работу, следовательно, изменяет состояние свое или объекта, т. е. состояние внешней среды. Эти изменения фиксируются системой очувствления и т. д. Таким образом, цикл замыкается.

Технологическое оборудование, участвующее в выполнении операции наравне с манипулятором, мы не включили в состав робота. Однако иногда оно является частью робота. Так, например, бывает у сварочного, окрасочного адаптивных роботов и вообще у роботов, которые специализируются на выполнении одной какой-либо операции.

Манипулятор адаптивного робота чаще всего представляет собой сложный многозвенный механизм с антропоморфной кинематикой. Так, в состав одного из наиболее распространенных в настоящее время промышленных роботов «Puma» фирмы «Юнимейшн» (США) входит 6- или 5-степенной антропоморфный манипулятор, оснащенный электромеханическими сервоприводами. Каждая степень подвижности управляется двигателем постоянного тока, оснащена потенциометрами обратной связи и кодовыми датчиками. Манипулятор имеет грузоподъемность 1—10 кг (в зависимости от модели), повторяемость $\pm 0{,}1$ мм и максимальную скорость перемещения захвата ~ 1 м/с. Робот может быть использован на операциях сборки, дуговой

сварки, окраски, а также на транспортных операциях. Манипулятор, который входит в состав сборочного робота RS1, фирмы «Ай-би-эм» (IBM, США), также является 6-степенным. Он оснащен гидроприводами, имеет грузоподъемность 1,3 кг, скорость перемещения захвата составляет 1 м/с.

Как говорилось выше, исполнительный механизм адаптивного робота — это чаще всего манипулятор, снабженный сервоприводами. Это вполне естественно, поскольку адаптивные свойства робота, как правило, проявляются в коррекции движения манипулятора в соответствии с показаниями системы очувствления. Однако иногда в состав адаптивного робота могут входить и цикловые манипуляторы, причем адаптация в этом случае заключается в смене последовательности обхода наперед известных точек позиционирования.

Приводы подвижных сочленений манипулятора адаптивного робота не имеют каких-либо существенных отличий от привода неадаптивного робота, за исключением наличия более совершенных регуляторов (корректирующих устройств), которые обычно реализуются на базе микропроцессорных устройств.

Как отмечалось выше, адаптивные свойства робота иногда можно реализовать без развитой системы очувствления, используя для целей адаптации только информацию о текущем состоянии исполнительного механизма. Тогда способ адаптации заключается в построении устройства (аппаратного или программного), в функции которого входит оценивание тех или иных параметров внешней среды (например, массы груза в захвате манипулятора), и в соответствующей коррекции управляющего сигнала таким образом, что возмущение будет мало отличаться от программного. Это устройство можно рассматривать как часть регулятора привода адаптивного робота.

Среду функционирования адаптивных ПР можно охарактеризовать ее физическими свойствами, геометрическими параметрами рабочей зоны и параметрами объектов манипулирования (рис. 1.2).

Физические свойства среды функционирования оказывают существенное влияние на выбор того или иного типа датчика, на надежность каналов передачи информации, потребляемые мощности и конструктивное выполнение манипулятора. Разнообразие возможных свойств среды свидетельствует о сложности выбора какого-либо одного типа датчика для построения адаптивных роботов.

Геометрические параметры среды функционирования необходимо учитывать при выборе типа кинематической схемы манипулятора, его быстродействия и при планировании траекторий перемещения захвата.

В зависимости от типа участка, обслуживаемого роботом, изменяются требования к его точности позиционирования. Суммарная погрешность позиционирования не должна приводить к снижению требуемой точности установки детали в технологическое оборудование (матрицу штампа, патрон токарного станка и т. п.). Погрешность установки объекта в приспособление складывается из двух составляющих: погрешности несовпадения центра формы детали с опреде-

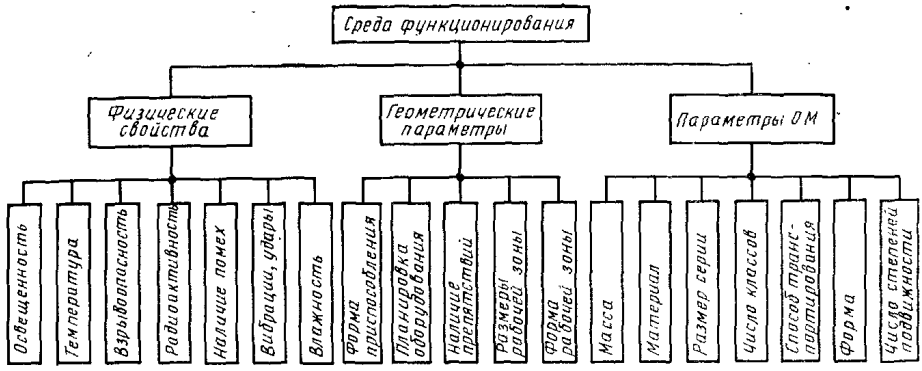


Рис. 1.2. Организация среды функционирования

ленным центром в оборудовании и погрешности ориентации по углу относительно некоторой оси. Суммарная погрешность позиционирования адаптивных роботов в 52 % случаев должна быть менее 1 мм, в 13,5 % — от 1 до 2,5 мм и в 34,5 % — не более 10 мм. Анализ составляющих погрешности показывает, что в основном погрешность определяется неточностью ориентации деталей по углу.

Характеристики объектов манипулирования (ОМ) адаптивных роботов оказывают влияние на выбор типа и структуры систем очувствления, конструкцию исполнительного устройства и функции робота в целом. Характеристики объекта манипулирования (см. рис. 1.2) определяют тип рабочей зоны робота. Различают несколько постановок задач по организации рабочей зоны роботов.

Функции робота могут изменяться в очень широких пределах— от проверки наличия ОМ в кассете до извлечения заданного ОМ из навала. Поэтому при построении адаптивных роботов необходимо учитывать конкретную организацию рабочей зоны. В подавляющем большинстве случаев рабочая зона может быть организована таким образом, что ОМ поступают в поле зрения датчика по одному.

Выбор того или иного типа датчиков или их сочетания при построении системы восприятия адаптивного робота определяется конкретным типом решаемой задачи. На основе информации, получаемой о состоянии внешней среды, реализуется адаптивное управление робототехническими системами.

1.2. Принципы восприятия, обработки информации и управления

Информацию, необходимую для выполнения задания, поставляет роботу система очувствления — важнейшая подсистема адаптивного робота. Чаще всего эта информация непосредственно связана с состоянием пространства, в котором функционирует робот, и ее источниками являются системы технического зрения, силомоментные, локационные и тактильные системы. Однако иногда эту информацию удается получить косвенно, измеряя лишь параметры самого испол-

нительного механизма, и на основании этих измерений сделать некоторые выводы о состоянии рабочего пространства.

Система очувствления может выполнять либо функции простой передачи полученной информации о рабочем пространстве в систему управления, где эта информация обрабатывается соответствующим образом, либо функции обработки этой информации. В последнем случае система очувствления кроме датчиков содержит еще устройства преобразования и предварительной обработки информации, а также микроЭВМ или микропроцессоры.

Развитая система очувствления робота может автономно формировать задание по обработке информации о внешней среде и осуществлять согласованный обмен данными и командами с системой управления. Поэтому в общем случае система очувствления адаптивного робота должна быть рассчитана на работу с оператором (см. рис. 1.1).

Номенклатура систем очувствления, включаемых в состав промышленного робота для обеспечения ему возможности адаптации к изменениям параметров как собственных, так и внешней среды, определяется многими факторами, среди которых можно указать следующие: 1) сложность построения априорной модели технологического процесса; 2) сложность учета параметров принципиально предсказуемых возмущающих факторов; 3) технические и вычислительные трудности расчета законов изменения управляемых координат на основе сложной априорной модели; 4) доступность и стоимость средств очувствления необходимых типов; 5) возможность и простота сопряжения средств очувствления с системой управления робота; 6) наличие программного обеспечения для обработки информации датчиков очувствления, разработанного применительно к данной технологической операции.

Таким образом, основное назначение систем очувствления промышленных роботов состоит в том, чтобы существенно снизить объем необходимой априорной информации. Кроме того, их включение в состав систем управления позволяет существенно упростить процедуру обучения робота, повысить его динамическую точность и быстродействие.

Значительная часть информации о внешней среде, собираемая с помощью средств очувствления, представляет собой геометрические характеристики объектов манипулирования и предметов, окружающих робот, их местоположение, форму, размеры и т. п. Кроме того, для автоматизации некоторых технологических операций необходимо знать модуль и направление сил и моментов, действующих в точке контакта захвата или инструмента робота с изделием, усилие захватывания или шарнирные моменты в подвижных сочленениях робота.

В соответствии с наиболее часто используемыми методами измерения геометрических характеристик и силовых параметров взаимодействия робота с окружающей средой средства очувствления по способности воспринимать информацию на различных расстояниях от ее источника могут быть условно разделены на контактные и бесконтактные (рис. 1.3).

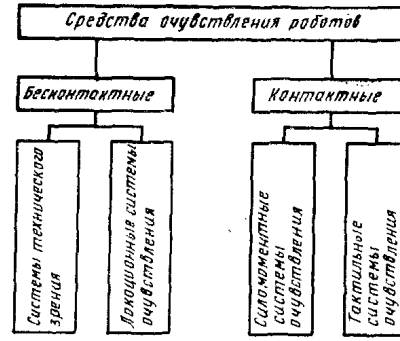


Рис. 1.3. Типы средств очувствления адаптивных роботов

Бесконтактные средства очувствления, оперирующие с геометрическими характеристиками объектов внешней среды робота, включают два класса устройств: системы технического зрения и локационные системы очувствления, а средства очувствления контактного действия, которые измеряют действующие на манипулятор силы и моменты, а также фиксируют координаты точек их приложения, представлены системами силомоментного и тактильного очувствления.

Целесообразность разделения средств очувствления на четыре класса обусловлена характером технологических операций, для автоматизации которых они предназначены.

Создание силомоментных систем вызвано необходимостью измерения сил и моментов в процессе взаимодействия захвата или инструмента с объектом манипулирования при выполнении механической сборки, абразивной зачистки и шлифовки изделий. Применение в автоматических манипуляторах силомоментных систем очувствления позволяет автоматизировать указанные технологические операции при минимуме затрат на разработку и создание дополнительного оборудования, например, конвейеров и позиционеров, обеспечивающих высокую точность начальной установки собираемых деталей. Эти системы очувствления могут быть с успехом использованы также и для решения многих манипуляционных задач, особенно при работе с жесткими деталями, когда незначительные погрешности позиционирования робота могут вызвать большие усилия, которые проконтролировать и измерить другими средствами не представляется возможным.

Силомоментные системы очувствления представляют собой датчик и устройство предварительной обработки информации, обеспечивающие измерение в общем случае трех проекций вектора силы и трех проекций вектора моментов, возникающих при взаимодействии захвата или инструмента робота с обрабатываемой деталью.

Датчики силомоментного очувствления размещают либо между последним звеном робота и захватом, либо непосредственно в его губках, что обеспечивает измерение тех компонент силового взаимодействия манипулятора с деталью, которые определяют качество выполнения заданной технологической операции.

Системы технического зрения (СТЗ), также представляющие собой отдельный тип систем очувствления, находят широкое применение в промышленном производстве на операциях распознавания и сортировки деталей, операциях разбора деталей из навала, для измерения координат движущихся деталей, подлежащих захватыванию, для определения положения характерных точек и ориентации

деталей на сборочных участках, на операциях контроля качества обработки или покрытия поверхностей деталей и на многих других операциях. Причем в ряде случаев эти системы могут быть использованы как совместно с автоматическими манипуляторами, так и независимо от них.

СТЗ представляет собой пример уровня иерархии системы управления, выделившегося в отдельную подсистему часто со своим собственным вычислителем. Появление быстродействующих и дешевых микроЭВМ и микропроцессоров позволило осуществить разработку и выпуск ряда систем технического зрения, внедрение которых в области сборки, дуговой сварки, окраски и контроля изделий дало большой экономический эффект.

Большинство существующих СТЗ — это перепрограммируемые, обучаемые автоматы, решающие в реальном времени протекания технологического процесса упрощенные задачи идентификации изделий, определения координат и характерных особенностей деталей.

СТЗ, используемые для операций контроля качества готовых и обрабатываемых деталей, могут обеспечить 100 %-ный контроль по внешнему виду (выявление трещин, пятен, сколов, определение цвета, качества этикеток, идентификация меток на изделиях и т. п.) и контроль размеров (длины, диаметра, шага, нелинейности и пр.) с выдачей статистических сведений о характере брака. Например, система технического зрения нашла применение на операциях шлифования отливок.

По мере совершенствования СТЗ их функциональные возможности все больше расширяются. Они находят применение, например, для решения таких сложных задач, как разбор отливок шатунов из навала и распознавание перекрывающихся плоских штамповочных заготовок. Особое внимание в последнее время уделяется разработке СТЗ, способных идентифицировать промышленные детали по зашумленным изображениям при изменяющемся уровне внешнего освещения.

Локационные системы очувствления используют для измерения координат изделия в тех случаях, когда применение СТЗ по тем или иным причинам нецелесообразно или невозможно. Установка датчиков локационных систем на захвате или рабочем инструменте автоматического манипулятора обеспечивает, например, возможность точного слежения сварочной головки за траекторией шва, а также позволяет захватывать и устанавливать изделия на подвесном или ленточном конвейерах. Кроме того, локационные системы очувствления применяют в качестве датчиков безопасности для предотвращения столкновения подвижных частей манипулятора с предметами или людьми, случайно оказавшимися в его зоне обслуживания. Локационные системы очувствления с активным или пассивным методом обнаружения предметов часто в литературе называют датчиками безопасности.

Широкое применение в системах очувствления роботов находят ультразвуковые локационные системы. В силу специфических свойств ультразвуковых волн этот тип датчиков очувствления исполь-

зуется в основном для определения местоположения мобильных роботов и для обеспечения безопасности движения тележек внутрицеховой автоматической транспортно-накопительной системы, выпуск которых сейчас осуществляется в больших масштабах.

Локационные средства очувствления могут быть также использованы для простейшего распознавания деталей, имеющих различную отражающую способность поверхности.

Для установления факта касания губок захвата (или других частей робота) объекта манипулирования служат датчики тактильного типа. Расположенные на внутренних и внешних поверхностях захвата или в тех местах звеньев манипулятора, которые могут войти в соприкосновение с объектами окружающей среды, тактильные датчики помимо регистрации факта соприкосновения могут измерить значение контактного давления и определить наличие проскальзывания между соприкасающимися частями робота и объекта. Кроме того, так как всегда известно точное место установки каждого датчика на манипуляторе, тактильные системы очувствления позволяют определить координаты точки касания с объектом манипулирования относительно системы координат захвата или соответствующего звена робота.

Исследование областей применения тактильных датчиков показало, что их целесообразно использовать при поиске объектов, идентификации и определении их пространственного положения, а также при определении формы и положения объектов, зажатых в захвате, для обнаружения проскальзывания детали и при регулировании усилия захватывания.

Для обеспечения надежного захватывания тяжелых, но хрупких деталей, например, наполненных стеклянных колб и т. п., весьма эффективными оказываются тактильные датчики проскальзывания. Используя формируемые ими сигналы, удается установить усилие захватывания на минимально необходимом уровне так, что предмет оказывается надежно зажатым, не выскальзывает из захвата и в то же время не разрушается.

Несомненно, системы очувствления промышленных роботов, конструкция этих систем, характеристики и алгоритмы обработки информации нельзя рассматривать вне взаимосвязи с системой управления робота. Следует отметить, что многие проблемы согласования параметров систем очувствления, языков их программирования и процесса обучения с соответствующими характеристиками промышленного робота требуют своего решения и совершенствования. Среди таких проблем в области использования массива информации о внешней среде, формируемого с помощью систем очувствления роботов, необходимо отметить следующие три группы: представление информации, планирование обработки информации и организация адаптивного управления.

Для рационального использования информации, собираемой системами очувствления, необходимо разработать формализованное описание данных о параметрах робота и окружающем его рабочем пространстве в форме, обеспечивающей легкость доступа, удобства

кодирования и последующего ввода в цифровую систему управления манипулятора, а также организовать обработку сенсорной информации сразу на нескольких иерархических уровнях системы управления.

Планирование обработки информации — один из важнейших путей повышения эффективности работы всей системы управления адаптивного робота. Оно включает определение последовательности этапов преобразования модели внешней среды робота, обеспечение мультипроцессорного режима обработки данных, планирование последовательности опроса систем очувствления как перед началом выполнения роботом технологических операций, так и в ходе ее выполнения с указанием приоритета каждой из операций. Кроме того, целесообразно разработать интерактивные методы планирования последовательности обработки сенсорной информации с участием оператора-программиста, а также распространить результаты решения перечисленных выше проблем на системы группового управления промышленными роботами.

Проблемы организации адаптивного управления состоят в необходимости обеспечения одновременной обработки большого объема информации и формирования команд управления в реальном масштабе времени, моделирования процессов функционирования адаптивного робота с целью разработки методов самообучения систем управления на основе сенсорной информации, используемой и в процессе функционирования робота. Среди проблем управления адаптивными роботами следует отметить разработку методов управления с использованием элементов теории искусственного интеллекта и совершенствование проблемно-ориентированных языков для программирования процессов обучения и управления роботов, оснащенных системами очувствления.

Приведенный перечень проблем, которые приходится решать при создании совершенных адаптивных роботов, свидетельствует, что дальнейшее развитие систем очувствления в значительной степени определяется уровнем развития теории искусственного интеллекта.

Система управления адаптивного робота выполняет следующие основные функции: прием информации от системы очувствления и ее обработка, обеспечение связи с человеком-оператором, управление манипулятором в соответствии с задачей, сформулированной оператором, и той информацией, которую система управления получает от системы очувствления.

Одной из характерных особенностей адаптивного робота является четко выраженная иерархия его систем управления. Наличие иерархических уровней может быть присуще системам управления и неадаптивных роботов, однако иерархия — это необходимый способ организации целенаправленного поведения адаптивного робота. Этот способ заключается в декомпозиции функций системы управления робота, определении потоков информации между подсистемами, реализующими эти функции, и, наконец, реализации этих функций на соответствующих вычислительных устройствах.

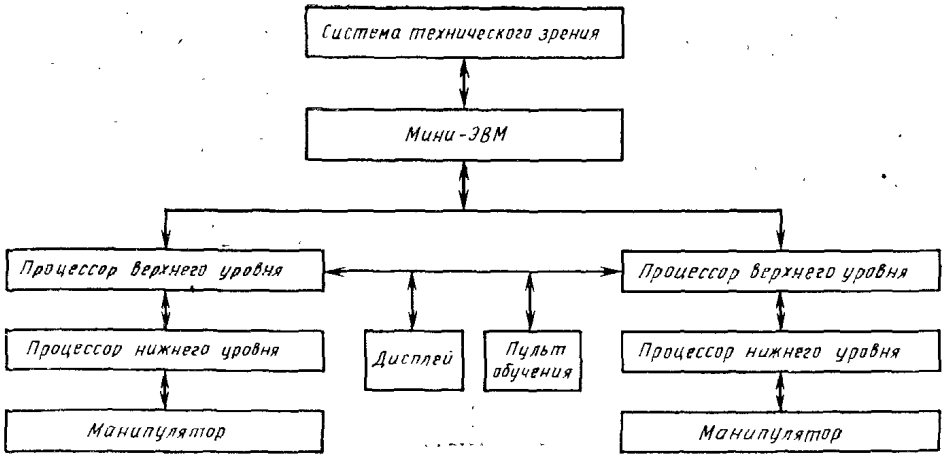


Рис. 1.4. Структура адаптивного двурукого робота

Ядром системы управления адаптивных роботов является, как правило, управляющая мини- или микроЭВМ, хотя в последнее время наметилась тенденция использования мультипроцессорных вычислительных систем.

Одним из основных направлений развития систем управления очувствления адаптивных роботов является увеличение мощности используемых вычислительных средств, являющихся важнейшей компонентой этих систем, что реализуется путем увеличения числа используемых процессоров, их функциональных возможностей, быстродействия, адресуемой памяти.

Так, система фирмы «Хитачи» (Hitachi, Япония) предназначенная для выполнения операции сборки одновременно двумя руками под управлением СТЗ с двумя телевизионными камерами, содержит шесть процессоров, образующих, по сути, вычислительную сеть, выполняющую все функции по согласованному управлению манипуляторами и анализу зрительной информации (рис. 1.4). В состав системы управления робота может входить мультимикропроцессорная система, содержащая пять микропроцессоров, в том числе один 16-битовый центральный микропроцессор.

Остальные четыре микропроцессора выполняют в основном арифметические функции, обеспечивая высокую точность позиционирования ($\leqslant 2$ мкм). Тенденция усложнения вычислительной системы будет доминирующей по крайней мере в ближайшее время, особенно, если учитывать, что промышленный робот, особенно адаптивный, необходимо рассматривать не обособленно, но как важнейшую компоненту ячейки гибкого автоматизированного производства, где его связи с технологическим оборудованием, а также с управляющими устройствами высшего уровня невозможны без развитой вычислительной системы, являющейся главной составной частью систем управления.

Программное обеспечение адаптивных роботов — это одна из основных проблем, стоящих перед разработчиками систем управле-

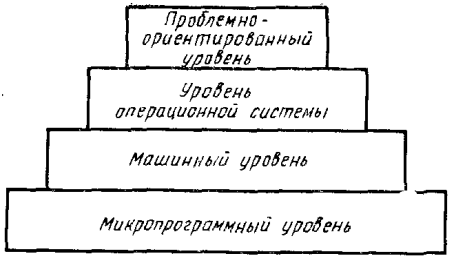


Рис. 1.5. Уровни программого обеспечения адаптивных роботов

ния и систем очувствления этих роботов, особенно СТЗ. По сравнению с роботами 1-го поколения, система управления которых, вообще говоря, могла и не содержать (и чаще всего не содержала) управляющей ЭВМ, роль программного обеспечения адаптивных роботов неизмеримо возросла, и по сути дела наряду с системами очувствления программное обеспечения определяет уровень адаптации робота.

Существуют различные подходы к разработке программного обеспечения адаптивных роботов. В последнее время все большее применение находит подход, основу которого составляет рассмотрение программного обеспечения как проблемно-ориентированной операционной системы, которая содержит практически все атрибуты универсальных операционных систем: развитое ядро, монитор, широкий набор управляющих и обрабатывающих программ (особую роль среди последних играют языковые трансляторы).

К достоинствам такого подхода можно отнести следующее.

1. Для проектирования и разработки программного обеспечения роботов можно воспользоваться богатым опытом и результатами, полученными при разработке универсальных операционных систем, а также операционных систем реального времени.

2. Аналогия с операционными системами порождает новые идеи и подходы, которые можно транспонировать с систем программирования вычислительных машин на системы программирования роботов.

Конструктивность рассматриваемого подхода состоит в том, что при проектировании программного обеспечения адаптивного робота используется универсальная операционная система не только как программная база инструментальных робототехнических комплексов, но и как ядро разрабатываемого проблемно-ориентированного обеспечения. На рис. 1.5 изображены уровни вычислительной машины; при этом каждый из уровней представляет собой некоторую виртуальную машину с собственной системой команд, так что уровень проблемно-ориентированного обеспечения адаптивных роботов использует все мощные средства программирования, которые предоставляются уровнем операционной системы: сюда входят не только языки программирования, но и системная поддержка исполнения рабочих программ управления движением манипулятора (обработка прерываний, управление вводом, выводом, распределение ресурсов при мультизадачном режиме работы).

Программное обеспечение адаптивных роботов должно представлять человеку-оператору широкие возможности по управлению роботом, его обучению в различной форме, редактированию и отладке программ движения, текстированию канала связи ЭВМ — манипулятор, работе с внешними накопителями и т. д. Кроме того,

такой классический атрибут универсальных операционных систем, как мультизадачность, становится чрезвычайно важным, так как позволяет придать программному обеспечению адаптивного робота следующие свойства.

1. Мультизадачность является практическим выражением иерархического способа организации системы управления адаптивного робота. При этом каждый уровень иерархии оформляется в виде одной или нескольких задач, каждая из которых реализует выполняемую данным иерархическим уровнем функцию, например, выделение уровня привода и уровня обработки сенсорной информации. Причем чаще всего этим задачам предоставлен отдельный процессор (для уровня привода иногда выделяется по одному процессору на каждый привод).

2. Человек-оператор имеет возможность вмешиваться в процесс исполнения роботом задания: приостановить его (с возможностью последующего перезапуска), динамически изменять его параметры (например, скорость движения захвата и т. п.).

3. Параллельно с исполнением роботом задания человек-оператор может формировать новые рабочие программы в виде текстов на входном проблемно-ориентированном языке управления.

В задачах, связанных с управлением сложными антропоморфными исполнительными механизмами, возникает проблема преобразования координат, заключающаяся в вычислении обобщенных координат по координатам захвата и обратно. Для решения этой задачи требуются достаточно большие вычислительные мощности; она также может быть реализована на отдельном процессоре.

Важнейшей характеристикой адаптивного робота является простота и легкость работы с ним человека-оператора. С одной стороны, оператор должен иметь возможность сформировать задание, которое не обязательно должно быть прямо связано с движением манипулятора; с другой стороны, робот должен при необходимости информировать оператора о состоянии системы в целом, этапах исполнения задания и т. д. Все эти функции обеспечивают программное обеспечение системы управления адаптивного робота, а именно та его часть, которую по аналогии с универсальными операционными системами называют монитором.

Язык, на котором формируется задание роботу, а также транслятор с него являются важнейшей частью программного обеспечения адаптивного робота. По мнению ряда авторов, основная задача разработки программного обеспечения — это создание высокоуровневых проблемно-ориентированных языков управления роботом.

Проблемно-ориентированный язык управления — это в большей степени компонента программного обеспечения адаптивного робота, поскольку роботу 1-го поколения свойственна жесткая программа, сформулированная в виде последовательности точек позиционирования, которые робот должен обойти, чтобы выполнить задание. Для адаптивных роботов программа как фиксированный набор данных неприемлема, поскольку заранее (в тот момент, когда составляется программа) неизвестны многие данные, входящие в программу: они

становятся известными на этапе исполнения. Поэтому основным способом представления задания адаптивному роботу является программа, написанная на проблемно-ориентированном языке.

В настоящее время наблюдается бурное развитие языков управления движением роботов.

К числу немногих реально используемых проблемно-ориентированных языков относится язык VAL, разработанный для семейства роботов «Puma» и входящий в состав системы программирования, включающей монитор, редактор, интерпретатор языка управления движением, систему управления файлами и обеспечивающей двухзадачный режим работы. VAL — это язык низкого уровня, рассчитанный на детальное планирование всех действий робота. В состав языка входит набор инструкций, позволяющих выполнить операции управления конфигурацией и движением манипулятора, управления захватом, арифметические операции над числами и координатами точек позиционирования, управления прохождением программы (условные и безусловные операторы ветвления), а также обеспечивающих связь с внешними устройствами и работу с системой технического зрения. Операторы, относящиеся к последней группе, позволяют инициировать СТЗ, считывать видеоинформацию и обрабатывать ее. Некоторые версии языка используют уже обработанную в СТЗ видеоинформацию, представляющую собой координаты центра детали и данные по ее ориентации.

PLAW — язык программирования адаптивного сварочного робота. Так же, как и VAL, —это язык низкого уровня, не требующий больших вычислительных мощностей (для его реализации достаточно одной микроЭВМ). В состав языка PLAW входят следующие группы инструкций:

управление движением манипулятора (перемещение от точки к точке с использованием различных способов интерполяции);

управление периферийным (в том числе сварочным) оборудованием;

управление прохождением программы.

Элементы адаптации робота отражены в различного рода условных операторах языка.

Такие языки, как MAL, LM, RAIL, LMAC, MCL, AL, позволяют программировать робот и сопряженное с ним оборудование для работы в различных условиях, однако они не нашли еще практического применения.

1.3. Модели проблемно-ориентированной среды

Робототехнические комплексы представляют собой взаимосвязанную систему машин, оборудования, транспортных связей, вычислительных и информационных средств, объединенных общностью решаемых задач и предназначенных для достижения единой цели.

Опыт разработки роботизированных систем и полученные результаты при решении задач автоматизации технологических процессов свидетельствуют о том, что методология проектирования робототех-

нических систем должна быть основана на системном подходе, позволяющем формировать общие типовые решения по созданию роботизированных технологий.

Адаптация к изменению внешней среды в ПР может осуществляться либо путем создания адаптивных модулей (при этом манипулятор функционирует по жесткой программе), либо путем коррекции программы управления манипулятором. В первом случае возможно использование самонастраивающихся и ориентирующих модулей с устройствами контроля положения объектов манипулирования.

Как было отмечено выше, характерным для адаптивных роботов является наличие единой управляющей системы, построенной с использованием микроЭВМ или мини-ЭВМ. Одной из основных задач, возникающих при построении алгоритмических и программных модулей для таких систем, является создание модели проблемно-ориентированной среды, которая при реальных характеристиках датчиков позволяла бы роботу распознавать определенный класс ситуаций. Под ситуацией при этом понимается описание некоторого состояния среды, складывающегося при определенных условиях с учетом функционального состояния робота. Поскольку структура адаптивного робота зависит от конкретного типа технологического процесса, можно говорить о модели проблемно-ориентированной среды.

Модель проблемно-ориентированной среды представляет собой совокупность взаимосвязанных сведений о реальной среде, в которой функционирует робот, необходимых и достаточных для решения конкретных задач из некоторого класса, определяемого назначением робота. Информация, содержащаяся в модели проблемно-ориентированной среды, включает сведения как общего характера, относящиеся ко всему классу задач, так и частного характера, справедливых только для данной конкретной задачи из класса.

К информации первого типа относятся следующие сведения: о закономерностях реальной среды, т. е. о компонентах, связях и отношениях, существующих между этими компонентами; о возможности воздействия на среду со стороны робота и изменениях, которые они вызывают; о вероятных изменениях в среде, не зависимых от робота, а также сведения о самом роботе и его возможностях.

К информации второго типа, характеризующей условия решения конкретной задачи, относятся сведения о требуемом результате решения и об ограничениях, накладываемых на процесс решения данной задачи.

Таким образом, задача отображения реальной среды в адаптивной системе тесно связана с задачей распознавания элементов физической среды и ее внутреннего состояния. Решение последней задачи в ряде случаев невозможно без учета инструментальных погрешностей датчиков и соответствующей коррекции первичного отображения внешней среды в системе. При решении указанных задач необходимо считаться с ограничениями, накладываемыми на объем средств, используемых для реализации моделей, и с требованиями к точности.

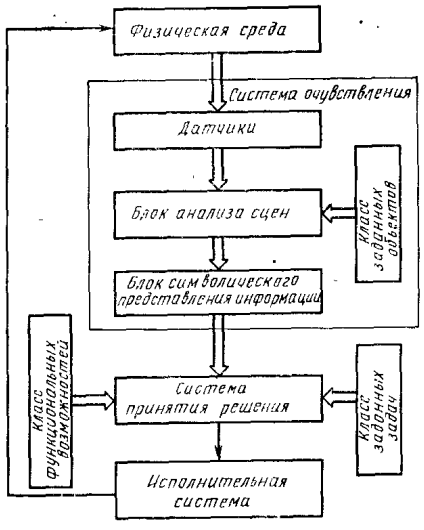


Рис. 1.6. Структурная схема формирования модели проблемно-ориентированной среды

Рассмотрим подробнее вопрос, связанный с созданием моделей среды. В первую очередь следует отметить тесную взаимосвязь структуры адаптивного робота и системы формирования модели проблемно-ориентированной среды.

Модель проблемно-ориентированной среды адаптивного робота может быть представлена следующей схемой (рис. 1.6). Физическая среда преобразуется рецепторной системой в некоторый многомерный сигнал. Блок анализа сцен определяет содержание во входном сигнале объектов заданного класса. Выходная информация этого блока поступает в блок символического представления информации, который осуществляет сжатие первичной информации и представляет ее в виде, удобном для использования. В системе принятия решения с учетом функциональных возможностей робота выделяется информация, необходимая для решения той или иной задачи из заданного класса задач, решаемых робототехническим комплексом. Полученная таким образом модель используется в дальнейшем системой выработки управляющих воздействий для управления используемой системой. Отработка исполнительной системой соответствующих воздействий на физическую среду приводит к корректировке модели проблемно-ориентированной среды.

Модель объединяет сведения, заданные в некотором формальном языке и отражающие как абстрактные знания, так и знания о некоторых ситуациях. Знания о конкретной ситуации подвержены более частым изменениям, чем абстрактные знания.

В общем случае при моделировании внешней среды можно выделить три уровня моделей. Модели первого уровня связаны с восприятием и обработкой сенсорной информации. Как правило, после предварительной обработки воспринимаемой информации составляется описание фрагмента среды и определяется отношение между объектами.

Модели первого уровня, как правило, служат основой построения моделей второго уровня, которые определяют работу планирующей системы робота. Языки описания моделей первого и второго уровней могут не совпадать.

Модели третьего уровня рассматриваются в формах общения человека-оператора с роботом. Язык общения может не совпадать с языком планирующей системы. В этом случае требуется перевод информации о среде и о планах действий, заданных в языке общения, на язык планирующей системы.

С точки зрения применения модели проблемно-ориентированных сред можно разделить на четыре группы: модели фиксированных, статических, динамических и не полностью определенных сред.

Под фиксированной средой понимается среда с определенной структурой, в которой может происходить лишь небольшое число заранее известных изменений. Модель такой среды задается конечным набором ситуаций, каждая из которых соответствует одному возможному изменению в среде, а каждой ситуации — вполне определенная стандартная программа действия робота. Информация о ситуациях может восприниматься самим роботом или быть задана человеком-оператором.

Под статической средой понимается среда, изменения в которой вызваны действиями робота или происходят мгновенно в дискретные моменты времени.

Модели динамических и не полностью определенных сред могут обладать разной степенью динамичности и неопределенности.

В зависимости от характера изменений, вносимых в модель в результате изменений в среде, не вызванных действием робота, модели статических сред можно разделить на замкнутые и открытые. Если изменения в модели заключаются во внесении некоторых новых соотношений (либо удаления старых) без изменения формулировки всей модели или ее значительной части и без изменения ее программной реализации, то такую модель называют открытой, а в противном случае — замкнутой.

Замкнутые модели применяют для описания сред, изменения в которых вызваны только действиями роботов. Среди замкнутых можно выделить модели на основе представления в пространстве состояний, или теоретико-графовые; редукционные модели; многоградационные модели с отношениями; многоградационные модели без отношений.

Модели на основе представления в пространстве состояний характеризуются тем, что собственно модель (множество состояний среды) задается одновременно с моделью действий (операторы) в виде векторов, двумерных массивов и т. п. Модели действий переводят одно состояние в другое. Их можно представить как функции состояний, заданные либо в виде таблиц, либо аналитически.

В силу того, что пространство состояний удобно представлять в виде направленного графа, модели, основанные на представлении в пространстве состояний, иногда называют теоретико-графовыми.

С помощью редукционных моделей описание целевого состояния среды (описание задачи) можно свести (редуцировать) к описанию такого состояния (подзадача), достигая которое можно легко достигнуть целевое. Для описания задач и подзадач могут быть использованы списки, векторы, массивы и другие формы. Оператор сведения задачи к подзадачам преобразует описание задач во множество результирующих или дочерних описаний задач. Решение всех дочерних задач обеспечивает решение исходной задачи. Для данного описания задачи может существовать много операторов сведения. Таким об-

разом, для того чтобы построить множество задач, все члены которого разрешимы, необходимо перепробовать целый ряд операторов.

Недостатком редукционной модели является то, что сама по себе она не позволяет выбрать метод оптимального разбиения задачи на подзадачи. С ее помощью можно решить задачу, если такое разбиение осуществлено. Примером редукционной модели является механизм, использованный в программе GPS. Редукционные модели относятся к моделям второго уровня и являются замкнутыми, так как любое изменение в описании задачи, вызванное применением зафиксированных операторов, соответствующих действиям робота, потребует уже иного оператора сведения данной задачи к подзадачам.

Многоградационные модели с отношениями — это модели, в которых среда представляется скомпонованной из конечного числа качественно разнородных элементов, находящихся в определенных отношениях друг с другом. Представления элементов среды в модели называются градациями модели. Отношения между элементами среды могут быть самыми разнообразными (место — действие, причина — следствие и т. п.), но при оперировании с моделями данного класса не используются развитые в математической логике методы. К этому классу относятся и модели ситуационного управления, которые в ряде случаев дают возможность достаточно полно отразить состояние среды. Для описания модели применяется специальный модельный язык, а в качестве процедур решения используется аппарат формальных трансформационных грамматик. Для данного подхода характерен анализ некоторого множества решений задач требуемого класса. На основе определенных методов обобщения система формирует модель среды в виде множества описаний классов ситуаций и соответствующих им решений. Процесс решения сводится к отнесению текущей конкретной ситуации к одному из априорно сформированных классов и применению к ней решения, соответствующего этому классу. Недостатком ситуационного управления является то, что вычисление существенного класса понятий (соответствующих элементам среды, членение которых на составляющие нецелесообразно) и выбор трансформационной грамматики (набора правил преобразования ситуаций после совершения действий) для каждой конкретной среды осуществляется оператором. Это затрудняет использование метода при создании адаптивных роботов широкого применения.

К многоградационным моделям без отношений можно отнести модели, в которых среда представляется комбинацией нескольких качественно разнородных признаков объектов без явного выделения отношений между объектами. Действия робота при этом являются реакцией только на определенные качественные градации среды или на объекты определенного типа. Модели этого класса могут быть разделены на модели, конкретные ситуации в которых отображаются набором данных, поступающих с датчиков непосредственно на вход блока анализа, и на модели, в которых сенсорная информация перед поступлением на вход блока анализа аппроксимируется некоторыми функциональными зависимостями.

Определенный интерес представляет рассмотрение лингвистических моделей, к которым относятся модели, построенные на основе формализаций, применяемых для строгого описания тех или иных свойств естественного языка. В качестве формализаций наиболее часто используются семантические сети и формальные грамматики.

Семантическая сеть представляет собой направленный граф с помеченными вершинами и дугами, причем вершинам соответствуют некоторые отношения между объектами. Все многообразие семантических отношений условно можно разделить на четыре класса: лингвистические; логические; теоретико-множественные; квантификационные.

Формальные (или порождающие) грамматики могут быть применены для описания и распознавания сложных трехмерных сцен. В рамках лингвистического подхода обычно считают, что образы строятся из соединенных различными способами подобразов так же, как фразы и предложения строятся путем соединения слов, а слова составляются из букв. Этот подход целесообразен лишь тогда, когда распознать простейшие подобразы (непроизводные элементы) легче чем сами образы. Следует отметить, что для реализации лингвистических моделей требуется достаточно большая мощность вычислительных средств.

Структурно в модели проблемно-ориентированной среды адаптивного робота можно выделить две составляющие: модели, используемые подсистемами восприятия информации о внешней среде, и модели, позволяющие оценивать функциональные возможности робота при реализации заданного плана действий.

Из моделей первого типа можно выделить модели, формируемые с использованием непроизводных элементов среды, получаемых на выходе датчиков очувствления, и модели, в которых используются непроизводные элементы среды, задаваемые человеком-оператором на основе обработки априорной информации о среде.

Для исследования каждого конкретного адаптивного робота должна быть составлена своя математическая модель и выбран свой алгоритм вычисления. Основное внимание уделяется исследованию динамических свойств и кинематике манипуляторов, а также вопросам управления ими в сравнительно простых средах без препятствий.

Для комплексного исследования адаптивных роботов наиболее перспективным является подход, основанный на использовании проблемно-ориентированных вычислительных систем как инструмента исследований. При этом одним из основных методов исследования роботов является имитационное моделирование. С его помощью можно реализовать системный подход к исследованию этих роботов.

Для адаптивных роботов можно выделить следующий набор имитационных моделей: собственно физической среды, в которой функционирует робот; процесса восприятия среды с помощью датчиков с определенными техническими параметрами; функционирования манипулятора в сложных средах (в том числе и с препятствиями); поведения робота в стереотипных ситуациях; оценки динамических характеристик манипуляторов. Для подвижных адаптивных робо-

тов можно дополнительно выделить модель передвижения робота к объектам манипулирования, модель, позволяющую оценивать управляемость робота для определенного диапазона скоростей движения, переменной массы и свойств трассы, а также модель, позволяющую решать задачи ближней навигации (в частности, предупреждение столкновений с препятствиями).

Каждая имитационная модель представляет собой машинный аналог соответствующего процесса.

Важным вопросом, связанным с созданием моделей, является их реализуемость с помощью современной вычислительной техники.

Разработка имитационной системы, включающей ряд программно-совместимых имитационных моделей, позволяет еще на этапе проектирования адаптивного робота оценить технические характеристики тех или иных его подсистем и выбрать датчики для конкретного технологического процесса.

Глава 2 ДАТЧИКИ СИЛОМОМЕНТНОГО И ТАКТИЛЬНОГО ОЧУВСТВЛЕНИЯ

2.1. Принципы измерения сил в силомоментных и тактильных датчиках адаптивных роботов

Силомоментными датчиками очувствления адаптивных роботов называют технические средства, предназначенные для измерения компонент главного вектора сил и моментов, действующих на рабочий орган манипулятора, в проекции на связанную с датчиком систему координат.

Силомоментные датчики обычно размещают либо непосредственно в губках захвата, либо между последним звеном и захватом манипулятора. Последнее конструктивное решение более предпочтительно в случае, когда в процессе работы необходимо автоматически заменять рабочий орган.

Известны варианты установки рассматриваемых датчиков отдельно от манипулятора, например, в основании координатного стола, на котором закреплена обрабатываемая деталь (рис. 2.1). В этом случае параметры силового взаимодействия захвата манипулятора и детали измеряются относительно неподвижной декартовой системы координат.

Датчиками тактильного очувствления называют технические средства, предназначенные для определения координат точки касания захвата с объектом манипулирования (объектом) и измерения контактного давления.

Тактильные датчики позволяют зарегистрировать факт наличия касания рабочего инструмента робота с объектом, обеспечивают определение направления и скорости относительного скольжения объекта по поверхности захвата, а также измерение силы его сжатия. Обычно тактильные датчики размещают на внутренних и внешних поверхностях захвата или инструмента.

Преобразование сил, возникающих при физическом контакте захвата с объектом, в электрический сигнал в рассматриваемых датчиках осуществляется двумя путями. Первый из них заключается в непосредственном измерении упругих деформаций чувствительных элементов датчика. Наиболее часто для этого применяют тензорезисторные, пьезоэлектрические и магнитоупругие преобразователи.

Второй способ преобразования тактильной и силовой информации в электрический сигнал заключается в измерении микроперемещений калиброванных пружин датчика, деформируемых под действием внешних сил в процессе контакта захвата с объектом. При этом используют известные электрические, магнитные и оптические

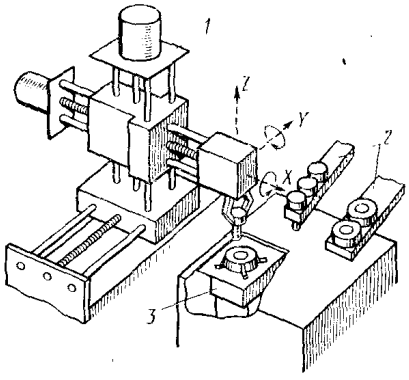


Рис. 2.1. Сборочный робот с силомоментным датчиком, устанавливаемым в основании координатного стола:
1 — робот; *2* — питатели; *3* — датчик

методы измерения малых перемещений.

Непосредственное измерение упругих деформаций с помощью тензорезисторных датчиков — наиболее распространенный метод. Известна широкая номенклатура полупроводниковых и проводниковых тензорезисторов, имеющих характеристики, которые отвечают требованиям, предъявляемым к чувствительным элементам тактильных и силомоментных датчиков.

Полупроводниковые тензорезисторы представляют собой пластинку кремния с приваренными к ней выводными проводниками. База полупроводниковых тензорезисторов различных марок, например, КТД, КТДМ, КТЭ, КТЭМ, Ю-8, Ю-12, колеблется в пределах 2—7 мм при его ширине и толщине 0,2 и 0,15 мм соответственно. Коэффициент чувствительности кремниевых тензорезисторов составляет примерно $\pm$ (100÷150). Среднее значение сопротивления тензорезистора в зависимости от длины его базы находится в пределах 100—800 Ом при допустимой силе тока через датчик 15 мА.

Если упругий элемент тактильного или силомоментного датчика представляет собой стержень или балку, на которых установлены тензорезисторы, образующие полную мостовую измерительную схему, то при максимальной упругой деформации $2 \cdot 10^{-3}$ выходной относительный сигнал будет составлять примерно 50—150 мВ/В в зависимости от номинального сопротивления и коэффициента чувствительности применяемых датчиков.

Температурные характеристики существующих полупроводниковых тензорезисторов пока еще не полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним, что следует учитывать при выборе соответствующих измерительных схем. Идентичность механических и электрических характеристик полупроводниковых тензорезисторов достигается при условии изготовления всех четырех элементов, образующих мостовую измерительную схему, в едином технологическом процессе. Тензорезисторы выращивают либо на подложке из диэлектрика типа сапфира или кварца, либо на стальной упругой подложке, изолируя полупроводники от металла с помощью диэлектрической пленки. Монтаж подложки с тензорезистором на упругом элементе силомоментного датчика осуществляется с помощью клеевого или сварного соединения.

Из проводниковых тензорезисторов наиболее широкое распространение получили фольговые тензорезисторы, отличающиеся высокой стабильностью характеристик и низким температурным дрейфом. Однако они имеют в несколько десятков раз меньшую чувствительность к деформациям, чем полупроводниковые тензорезисторы,

при соизмеримости остальных параметров. Коэффициент чувствительности фольговых тензорезисторов равен 2—3, что существенно ограничивает максимальное значение выходного сигнала. Типичное значение выходного напряжения измерительного моста при максимальных нагрузках составляет 1—3 мВ/В в зависимости от номинального сопротивления тензорезисторов.

Наиболее часто в практике конструирования тактильных и силомоментных датчиков очувствления применяют фольговые тензопреобразователи типа ФКПА, ФКТК, ФКАД, ФК-ПА, ФК-ПВ и ФК-РА. Следует отметить, что в силу больших размеров (база 3—20 мм, ширина 1,5—10 мм, толщина 0,2 мм) по сравнению с полупроводниковыми фольговые тензорезисторы допускают более высокий номинальный ток (до 50 мА) за счет большей площади контакта с упругим элементом и лучшего отвода тепла. Номенклатура выпускаемых серийно фольговых тензорезисторов более обширна, чем номенклатура полупроводниковых тензорезисторов, и включает различные типы элементов для регистрации изгибных и сдвиговых деформаций, комбинированные преобразователи, допускающие измерение деформаций сразу в двух направлениях, а также всевозможные розетки тензорезисторов, расположенных под углами 45, 90 и 120° относительно осей соседних элементов.

Применение фольговых тензорезисторов целесообразно в тех случаях, когда требуется высокая стабильность характеристик датчика в широком температурном диапазоне. Однако для их применения необходимы высококачественные усилители сигнала с низким температурным дрейфом и большим коэффициентом усиления. При этом может быть создано измерительное устройство, имеющее суммарную погрешность, не превышающую 0,1 %.

Датчики с фольговыми тензорезисторами имеют очень низкое выходное напряжение, передача и обработка которого, например, при наличии сильных электромагнитных помех, может стать затруднительной. Поэтому часто внутри корпуса датчика, который в большинстве случаев является хорошим электрическим и магнитным экраном, размещают выполненный по интегральной технологии предварительный усилитель, который обеспечивает выходное напряжение порядка единиц вольт.

Тензорезисторы имеют простую конструкцию, легко монтируются на упругих элементах тактильных или силомоментных датчиков. Они обеспечивают требования, предъявляемые к точности измерений, но при отработанной технологии наклейки этих тензорезисторов. Собственная резонансная частота тензорезисторного датчика зависит только от свойств его упругих элементов и не зависит от свойств чувствительных элементов.

Применение полупроводниковых тензорезисторов целесообразно во всех случаях, когда допускается температурная погрешность дрейфа нуля выше $5 \cdot 10^{-2}$ % °С и требуется высокая чувствительность при малых габаритных размерах датчика и усилителей.

Фольговые тензорезисторы оказываются более предпочтительными при повышенных требованиях к температурной стабильности,

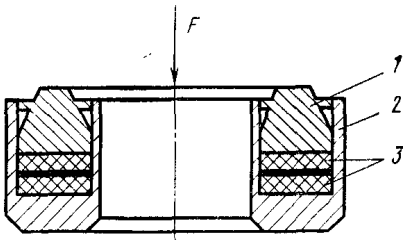


Рис. 2.2. Кварцевый датчик силы:
1 — силораспределительный элемент; *2* — корпус в виде упругой гильзы; *3* — кварцевые шайбы

а также при наличии химического загрязнения среды или повышенного уровня радиации в помещениях, где эксплуатируется промышленный робот.

Для непосредственного измерения упругих деформаций могут быть использованы пьезоэлектрические датчики, действие которых основано на измерении заряда, пропорционального внутренним механическим напряжениям растяжения-сжатия или сдвига, вызванным действующей силой. Типичные датчики силы представляют собой кварцевые или пьезокерамические шайбы, установленные соосно в цилиндрическом корпусе (рис. 2.2). Преимуществами пьезоэлектрических преобразователей являются их малые размеры и масса. Однако существуют технологические трудности изготовления кварцевых чувствительных элементов на нагрузки менее 10 Н, когда диаметр шайб должен быть очень мал.

Основной недостаток пьезоэлектрических чувствительных элементов проявляется в эффекте стекания заряда. Это приводит к тому, что при типичных значениях емкости датчика 10 пФ и суммарном сопротивлении утечки 10^{13} Ом нижняя граница частоты для динамических измерений составляет приблизительно $2 \cdot 10^{-4}$ Гц, так как общая постоянная времени датчика достигает 10^3 с. Однако при единичном скачкообразном входном силовом воздействии уже через 1 с появится погрешность в 10^{-3} из-за стекания заряда.

Использование прямого пьезоэффекта обеспечивает в полной мере измерение только динамических и квазистатических сил. Поэтому пьезоэлектрические датчики подобного типа целесообразно использовать в тактильных системах, которые регистрируют факт наличия касания и мгновенное значение контактной силы, а также в силомоментных системах, предназначенных для измерения динамических сил.

Новые перспективы в конструировании силоизмерительных чувствительных элементов тактильных и силомоментных датчиков открывает использование пьезоэлектрического трансформаторного датчика, коэффициент передачи которого зависит от действующей на него статической силы. Сохраняя все основные достоинства пьезоэлектрических датчиков силы: высокую жесткость, низкую чувствительность к изменениям температуры и малые размеры, пьезоэлектрический трансформатор позволяет осуществлять измерение статических сил (рис. 2.3).

Датчик состоит из пьезоэлектрического трансформатора, представляющего собой пьезоэлемент с двумя парами электродов, к одной из которых подключен генератор электрических колебаний, а другая соединена с измерительной цепью. Пьезоэлемент помещен между демпфирующими прокладками. Измеряемое усилие передается на пьезоэлемент посредством силовводящего элемента

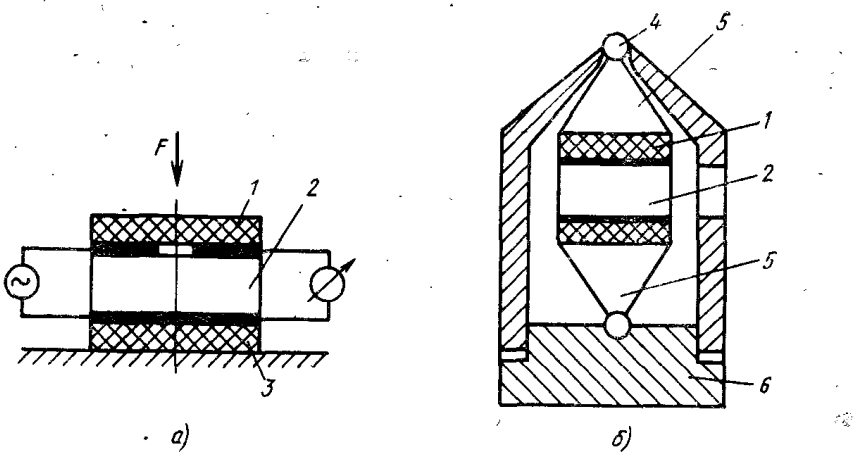


Рис. 2.3. Пьезоэлектрический трансформаторный датчик:
а — схема; *б* — вариант конструктивного оформления; *1*, *3* — демпфирующие прокладки; *2* — пьезоэлектрический трансформатор; *4* — силовводящий элемент в виде стального шарика; *5* — силораспределитель; *6* — корпус

в виде стального шарика и силораспределителя конической формы.

Чувствительность пьезоэлектрических преобразователей статических сил с демпфирующими прокладками зависит от свойств материала и размеров пьезоэлемента. Устройства с серийно выпускаемыми пьезокерамическими дисками из материала ЦТС-19 имеют крутизну преобразования 1—5 В/Н.

Для повышения чувствительности датчика пьезоэлектрические трансформаторы объединяют в составные устройства, в которых несколько пьезокерамических дисков располагаются соосно (рис. 2.4). Между пьезоэлектрическими трансформаторами помещают демпфирующие прокладки, изолирующие их один от другого электрически и акустически. Выходные сигналы первого элемента усиливаются и подаются в виде напряжения возбуждения на следующий элемент. Таким образом, в данном преобразователе каждый пьезоэлектрический трансформатор, начиная со второго, возбуждается напряжением, пропорциональным приложенному усилию. Чувствительность составного пьезоэлектрического трансформатора находится в степенной зависимости от числа его элементов.

Чувствительность пьезоэлектрических преобразователей статических усилий с демпфирующими прокладками зависит также от места приложения усилия. Чем ближе к центру диска находится демпфируемая область, тем ниже чувствительность преобразователя. Это объясняется тем, что при возбуждении на резонансной частоте радиальной моды колебаний амплитуда смещений имеет максимальное значение по периметру и равна нулю в центре диска.

Основная конструктивная особенность пьезоэлектрических трансформаторных датчиков статических сил заключается в том, что их характеристики в значительной мере определяются свойствами выбранного материала демпфирующих прокладок и качеством обработки контактирующих поверхностей. Крутизна преобразования

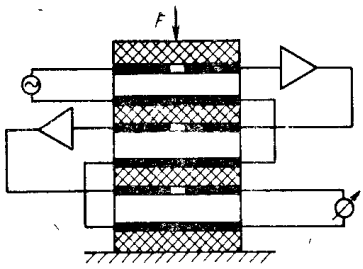


Рис. 2.4. Схема составного пьезоэлектрического трансформаторного датчика

пьезоэлектрического трансформатора с демпфирующими прокладками из резины и пластмасс в несколько раз меньше крутизны преобразования с демпфирующими прокладками из стали.

Диапазон измерения статических и динамических сил пьезоэлектрических трансформаторных датчиков определяется главным образом размерами пьезорезонатора. На основе серийно выпускаемых дисковых пьезорезонаторов могут быть сконструированы пьезопреобразователи, чувствительные к статическим силам с верхним пределом измерения до 10^3 Н.

Пьезоэлектрические кварцевые и керамические датчики с измерением заряда находят применение прежде всего при определении квазистатических сил при высоких температурах внешней среды и малых объемах для размещения датчика на роботе. Значительные трудности возникают при использовании таких датчиков для измерений при повышенной влажности окружающей среды.

Пьезокерамические трансформаторные датчики в силу их высокой чувствительности и малых размеров целесообразно использовать при конструировании пропорциональных тактильных матриц.

Эффект изменения магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием механических напряжений также может найти применение при конструировании силомоментных датчиков. Пример датчика с магнитоупругим чувствительным элементом приведен на рис. 2.5. В механически ненапряженном состоянии обмотка возбуждения датчика создает магнитное поле, вектор индукции которого направлен под углом 45° к вектору действующей силы. При механической нагрузке магнитное поле деформируется, причем вектор магнитной индукции изменяет свое направление, вследствие чего на вторичной обмотке датчика возникает напряжение, пропорциональное действующей силе. Большим преимуществом магнитоупругих датчиков со скрещенными обмотками является возможность их использования в экстремальных средах при высоких давлениях, влажности и повышенной радиации, когда требуется высокая надежность и не слишком высокая точность. Магнитоупругие датчики могут быть использованы при нагрузках 10^3 Н и больше.

Для измерения малых перемещений упругих элементов при конструировании тактильных и силомоментных систем очувствления находят применение различные электромагнитные, емкостные и оптические чувствительные элементы.

Электромагнитные преобразователи — это простые и надежные устройства, которые позволяют использовать простые усилительные схемы. Частота тока питания может быть 50 или 400 Гц, что обеспечивает получение большой мощности выходного сигнала датчика. Электромагнитные преобразователи легко собираются и регули-

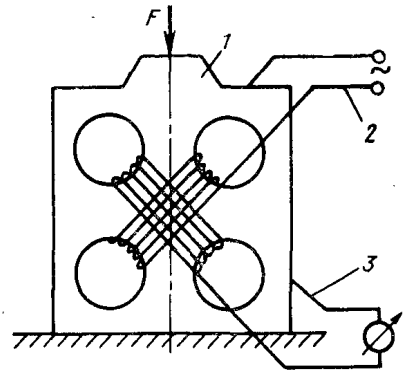


Рис. 2.5. Магнитоупругий датчик со скрещенными обмотками:
1 — чувствительный элемент; *2* — катушка возбуждения; *3* — измерительная катушка

руются, не имеют трения и отличаются крайне малой противодействующей силой. Однако у них сравнительно большой измерительный ход, и они не могут быть использованы в силомоментных и тактильных датчиках, обладающих высокой жесткостью. За счет нелинейности электрической характеристики погрешность электромагнитных преобразователей существенно выше, чем погрешность тензорезисторных преобразователей.

Емкостные преобразователи силы, как правило, используют для измерения зазора между обкладками конденсатора. Они имеют относительно малые размеры и характеризуются пренебрежимо малыми силами трения и противодействия. Основными недостатками емкостных преобразователей являются необходимость применения высоких несущих частот и их повышенная чувствительность к воздействию диэлектрических веществ (воды, масла).

Принцип действия существующих оптических измерителей перемещения основан на модуляции светового потока, падающего на фоточувствительную поверхность приемника, с помощью непрозрачной заслонки, связанной с упругим элементом датчика силы. В качестве чувствительных элементов и источника света в большинстве случаев используют светодиод-фотодиод.

Недостатки таких простейших оптических преобразователей связаны с большой нелинейностью характеристик, малым сроком службы и повышенной чувствительностью к воздействию различных загрязняющих веществ. В силу указанных недостатков оптические датчики нашли ограниченное применение для построения тактильных и силомоментных систем очувствления роботов.

2.2. Многокомпонентные датчики силомоментного очувствления

Кроме высокой надежности, точности, большого ресурса датчики силомоментного очувствления должны иметь следующие показатели:

малую массу и небольшие габаритные размеры, так как они устанавливаются непосредственно в губках захвата или в кисти робота;

большую жесткость, что необходимо для обеспечения высокой собственной резонансной частоты и снижения влияния упругих деформаций датчика на точность позиционирования захвата;

минимальный уровень перекрестных связей между каналами измерения различных компонент вектора сил и моментов;

высокую линейность и малый гистерезис;

число измеряемых проекций вектора сил и моментов должно обеспечивать эффективное выполнение роботом данной технологической операции.

Нельзя рассматривать характеристики датчика и не учитывать при этом параметры системы управления робота, для которого этот датчик проектируется. Например, требование высокой жесткости датчика значительно ограничивает выбор чувствительных устройств для преобразования приложенных сил в электрический сигнал. Кроме того, высокая жесткость датчика требует чрезвычайно большого быстродействия приводов манипулятора, поскольку при столкновении захвата, движущегося даже с небольшой скоростью, с объектом манипулирования скорость нарастания силы или момента может оказаться выше предельных динамических характеристик приводов, при этом либо датчик, либо манипулятор могут быть выведены из строя.

Аналогичные рассуждения можно привести по поводу требования высокой линейности измерения, так как во многих системах управления робота исходный аналоговый сигнал силомоментного датчика преобразуется в цифровой сигнал с ограниченным числом уровней квантования. В ряде сборочных промышленных роботов используются силомоментные датчики, обеспечивающие релейный характер измерений каждой проекции силового вектора. В конкретных применениях необходимо анализировать соответствие силомоментной системы очувствления параметрам робота, на котором она устанавливается.

Силомоментные датчики разделяют по двум признакам: способу преобразования измеряемого силового воздействия в электрический сигнал и по принципу выделения требуемых проекций вектора сил и моментов.

Первый классификационный признак основан на том, что в существующих силомоментных датчиках используют либо чувствительные элементы, измеряющие упругую деформацию, либо чувствительные элементы, регистрирующие перемещения калиброванных пружин датчика.

Классификация по принципу выделения измеряемых проекций вектора сил и моментов отражает подход к проектированию силомоментных датчиков очувствления. Можно максимально упростить конструкцию механической части датчика, однако это, как правило, влечет за собой усложнение электронного блока выделения проекций вектора сил и моментов относительно связанной с ним системы координат. С другой стороны, создают конструкции, в которых выделение компонент силового вектора осуществляется непосредственно в механической части датчика за счет соответствующего пространственного расположения упругих элементов.

Рациональным является поиск компромиссного пути разработки конструкций силомоментного датчика, оптимальной с точки зрения простоты выделения проекций вектора сил и моментов и допускающей размещение электронных блоков датчика внутри его механической части.

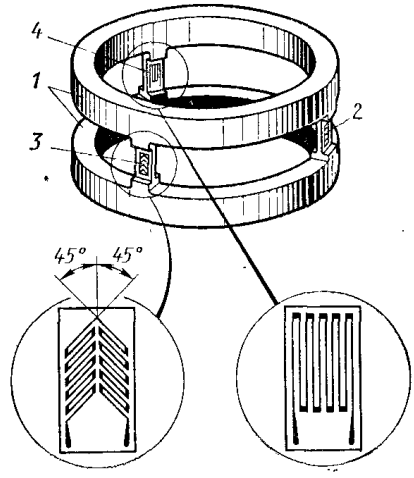


Рис. 2.6. Шестикомпоиентный датчик сил и моментов:

1 — присоединительные фланцы; *2* — упругие элементы с фольговыми тензорезисторами; *3* — тензорезистор для измерения деформации сдвига; *4* — тензорезистор, регистрирующий изгибные деформации и деформации растяжения-сжатия

Наиболее простым в конструктивном отношении является шестикомпонентный датчик, представляющий собой два кольцевых фланца *1*, соединенных тремя плоскими упругими элементами *2*, расположенными параллельно оси датчика под углом 120° друг к другу (рис. 2.6). На внутренней стороне упругих элементов наклеены фольговые тензорезисторы *4*, чувствительные к деформации растяжения-сжатия, а на внешней — фольговые тензорезисторы *3*, чувствительные к сдвиговой деформации. Три пары тензорезисторов обеспечивают измерение всех деформаций, возникающих в упругих элементах под действием произвольно направленных сил или моментов, приложенных к одному из фланцев датчика.

Особенность рассматриваемого датчика заключается в том, что он предназначен для измерения всех шести проекций силового вектора и не может быть использован для определения другого желаемого числа компонент без измерения остальных, поскольку в каждом тензоэлементе, размещенном на упругих элементах, возникают деформации практически от всех действующих сил и моментов.

Выделение проекций вектора сил и моментов в датчике этого типа осуществляется путем предварительного тарирования, которое заключается в следующем. К датчику поочередно по каждой координате прикладывают силу **F** (или момент) заданного значения и регистрируют уровень выходного сигнала **S** тензорезисторов, включенных в измерительную мостовую схему. Поскольку в пределах упругих деформаций датчик является линейным элементом, то связь между этими двумя векторами оказывается пропорциональной и описывается некоторой прямоугольной матрицей постоянных коэффициентов **W**. Таким образом, $\mathbf{S} = \mathbf{WF}$.

После окончания тарирования рассчитывают элементы обратной матрицы, которая необходима при определении вектора сил и моментов неизвестного значения и направления в соответствии с выражением $\mathbf{F} = \mathbf{W}^{-1}\mathbf{S}$. Последнее соотношение справедливо, если существует обратная матрица $\mathbf{W}^{-1}$, т. е. в том случае, когда исходная матрица пропорциональности **W** имеет квадратную форму.

Если матрица **W** прямоугольная, т. е. число чувствительных элементов датчика превышает число измеряемых компонент вектора сил и моментов, осуществляют псевдоинверсию матрицы пропорциональности: $\mathbf{F} = (\mathbf{W}^{\mathrm{T}}\mathbf{W})^{-1}\mathbf{W}^{\mathrm{T}}\mathbf{S}$, где т — знак транспонирования.

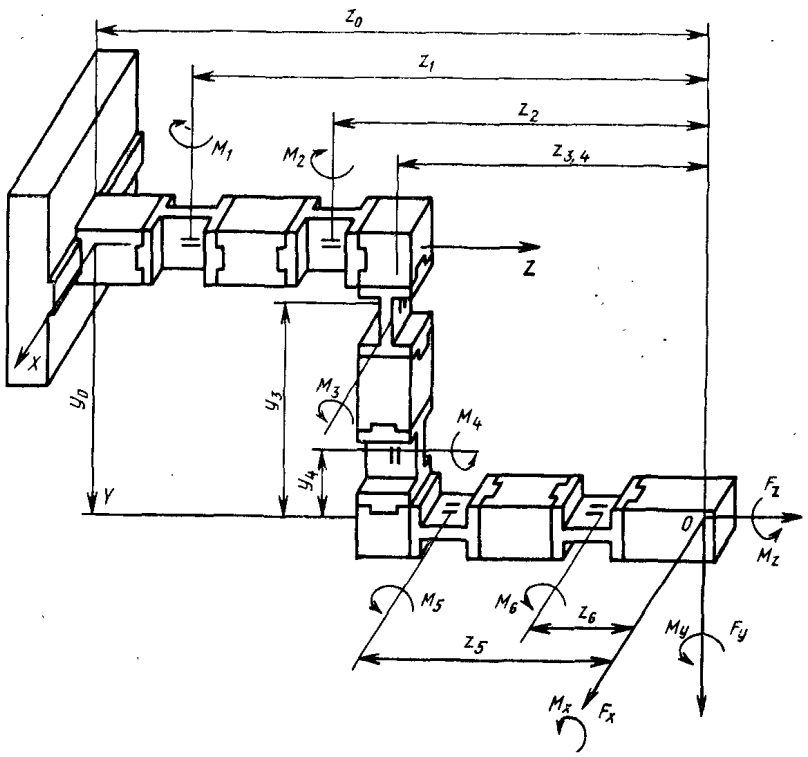


Рис. 2.7. Модульный шестикомпонентный датчик сил и моментов

Основным недостатком рассматриваемого датчика является низкий коэффициент использования диапазона линейных деформаций упругих элементов, так как каждый из них рассчитывается из условия максимального суммарного действия всех шести измеряемых компонент. По этой же причине невозможно создать датчик такого типа, имеющий различные диапазоны измерения каждой из компонент силового вектора. Кроме того, вычисление действующих сил в соответствии с указанными выше выражениями занимает достаточно много машинного времени и не всегда осуществимо для систем управления, работающих в реальном масштабе времени с использованием микроЭВМ.

Примером силомоментного датчика с преимущественно механическим разделением компонент вектора сил и моментов может служить датчик модульной конструкции, размещенный в основании пальцев захвата манипулятора. Этот датчик, в отличие от других, имеет очень простую пространственную геометрию, благодаря чему упругие элементы конструкции, представляющие собой взаимозаменяемые модули, могут быть легко рассчитаны для измерения заданной деформации (рис. 2.7).

Любая сила и момент, приложенные к губке захвата, могут быть представлены в виде шести проекций относительно системы координат, связанной с кончиком пальца. Используя уравнение связи дей-

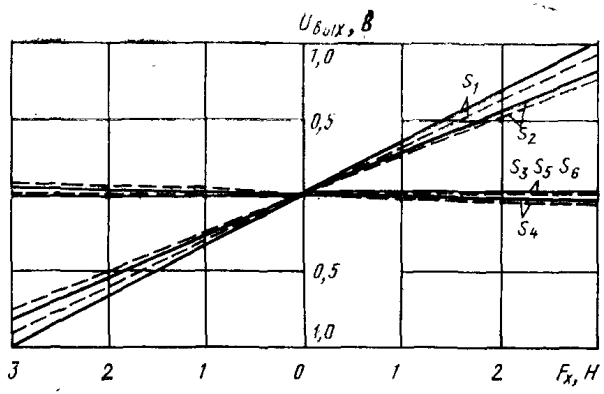


Рис. 2.8. Зависимости выходных напряжений тензомостов датчика от одной из компонент вектора силы

ствующих сил и моментов с изгибающими моментами каждого модуля и пропорциональными им выходными сигналами тензомостов датчика, можно определить искомые проекции вектора сил и моментов:

$$F_x = (S_1 - S_2)/(z_2 - z_1);$$
$$F_y = (S_6 - S_5)/(z_6 - z_5);$$
$$F_z = [S_3 + F_y(z_0 - z_3) - M_x]/(y_0 - y_3);$$
$$M_x = [-S_5(z_0 - z_6) + S_6(z_0 - z_5)]/(z_6 - z_5);$$
$$M_y = [S_1(z_0 - z_2) - S_2(z_0 - z_1)]/(z_1 - z_2);$$
$$M_z = S_4 + F_x(y_0 - y_4),$$

где индексы 1, 2, ..., 6 относятся к системам координат, связанным с осями упругих модулей.

На рис.2.8 показаны расчетные и экспериментальные зависимости выходных сигналов тензомостов датчика от силы F_x, отражающие низкий уровень перекрестного взаимного влияния между каналами (не более 1 %), хорошую линейность и достаточную степень совпадения теоретических (штриховые линии) и экспериментальных (сплошные линии) характеристик. Максимальный выходной сигнал $U_{вых}$ достигает 1 В, что обеспечивается благодаря применению полупроводниковых тензорезисторов с коэффициентом чувствительности, равным 150. Недостатками рассматриваемой конструкции являются значительные размеры датчика и неравномерная нагрузка на отдельные модули при одинаковых силах, действующих по различным осям.

Простой в конструктивном отношении силомоментный датчик может быть изготовлен из двух стальных угольников *1*, связанных в единую конструкцию системой шести плоских пружин *3* и шести упругих стержней *2* (рис. 2.9, *а*). Основным элементом датчика является плоская пружина с постоянным поперечным сечением, прогиб которой измеряется тензорезисторными датчиками. Преобразование исходного силового вектора F в совокупность изгибающих моментов плоских пружин осуществляется посредством стальных упругих стержней, которые передают усилие только в осевом направлении (рис. 2.9, *б*).

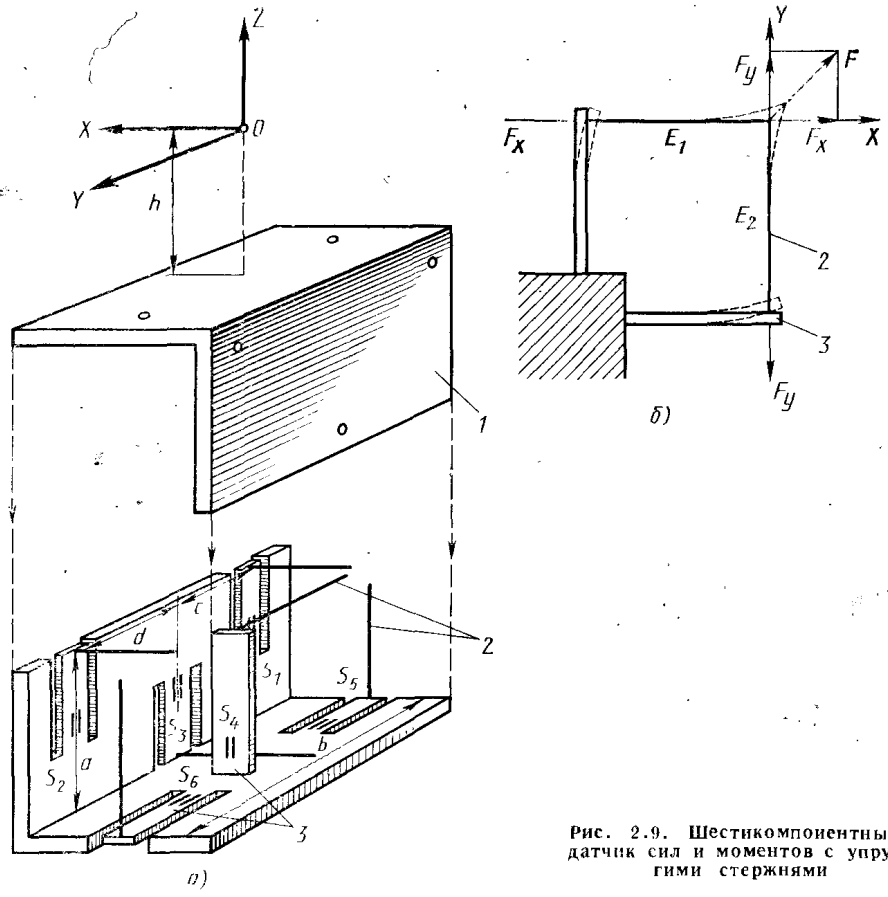


Рис. 2.9. Шестикомпоиентный датчик сил и моментов с упругими стержнями

Выделение искомых проекций вектора сил и моментов на систему координат, помещенную в конечную точку захвата O, осуществляется в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{cases} F_x = S_1 + S_2 + S_3; \\ F_y = S_4; \\ F_z = S_5 + S_6; \end{cases} \qquad \begin{cases} M_x = hS_4 - bS_5 + bS_6; \\ M_y = -hS_1 - hS_2 - (a+h)S_3; \\ M_z = c(S_1 - S_2). \end{cases}$$

К достоинствам конструкции следует отнести низкий уровень перекрестных связей между компонентами силового вектора (порядка 1 %) и простоту изготовления.

Образец датчика размерами $100 \times 40 \times 40$ мм обеспечивает измерение сил до 20 Н, моментов до 1 Н·м при линейности и гистерезисе порядка 0,5 и 0,1 % соответственно. Датчик имеет сравнительно низкую резонансную частоту, равную 10 Гц, что обусловлено низкой жесткостью конструкции с упругими стержнями, составляющую 10^4 Н/м.

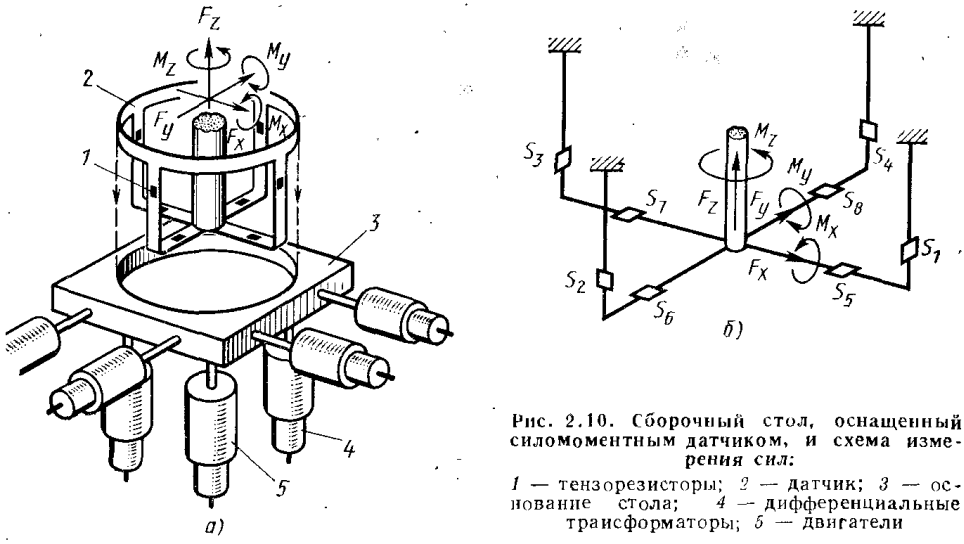


Рис. 2.10. Сборочный стол, оснащенный силомоментным датчиком, и схема измерения сил:

1 — тензорезисторы; *2* — датчик; *3* — основание стола; *4* — дифференциальные трансформаторы; *5* — двигатели

Основным недостатком данного устройства является низкий коэффициент использования диапазона измерения отдельных компонент, не превышающий 30 %.

Шестикомпонентный силомоментный датчик может быть использован при формировании сигналов коррекции положения адаптивного сборочного стола, оснащенного точными приводами. Основу конструкции силомоментного датчика составляют два П-образных упругих элемента, соединенных взаимно перпендикулярно между собой с помощью общего фланца (рис. 2.10, *а*). Нижняя часть устройства, представляющая собой плоскую упругую крестовину, обеспечивает измерение компонент M_x, M_y и F_z. С помощью верхних упругих элементов, параллельных оси датчика, определяют остальные три компоненты F_x, F_y и M_z. Тензорезистивные мостовые схемы, размещенные на плоской крестовине, регистрируют деформацию изгиба, в то время как тензорезисторы вертикально расположенных элементов фиксируют возникающие в них сдвиговые деформации.

Основные соотношения, позволяющие выделить измеряемые проекции главного вектора сил и моментов (рис. 2.10, *б*), для этого датчика могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} F_x = S_2 - S_4; & M_x = S_6 - S_8; \\ F_y = S_1 - S_3; & M_y = S_5 - S_7; \\ F_z = S_5 + S_6 + S_7 + S_8; & M_z = S_1 + S_2 + S_3 + S_4. \end{cases}$$

Значения измеряемых проекций сил F_z и моментов M_x, M_y экспериментального образца устройства такого типа составляют 20 Н и 0,1 Н·м при чувствительности $2 \cdot 10^2$ Н и $2 \cdot 10^{-3}$ Н·м соответственно. В то же время использование деформации сдвига для измерения компонент F_x, F_y и M_z существенно, примерно на порядок, снижает чувствительность датчика по этим каналам.

На основании известных соотношений, описывающих деформации сдвига и изгиба в балке прямоугольного сечения,

$$|S|_{\text{изг}} = \frac{6lF}{bh^2E}; \qquad |S|_{\text{сдв}} = \frac{3F(1+\nu)}{2Ebh},$$

где b — ширина упругого элемента; h — его толщина; l — расстояние от точки приложения силы до точки установки тензорезисторов; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона, равный для большинства упругих элементов 0,3, можно заключить, что конструктивным параметром, влияющим на деформацию сдвига упругого элемента, является только площадь его поперечного сечения, в то время как на деформацию изгиба упругого элемента кроме площади поперечного сечения оказывают влияние также его длина и высота. Последнее обстоятельство позволяет, используя упругие элементы деформации изгиба, более гибко подходить к проектированию силомоментных датчиков, которые должны обеспечивать измерение различных номинальных сил или моментов по отдельным координатам.

Этот принцип реализован в шестикомпонентном датчике сил и моментов, конструкция которого показана на рис. 2.11, *а*.

Датчик состоит из двух частей, каждая из которых может быть использована независимо от другой, обеспечивая измерение трех компонент вектора сил и моментов. Соединенные механически в единый блок, они образуют шестикомпонентный датчик.

Модуль, предназначенный для измерения компонент F_x, F_y и M_z, представляет собой две рамки *4*, *5*, к которым крепятся четыре упругих элемента *2*, образованные парами плоских пружин *1* и *3*, ориентированных вдоль оси элемента и повернутых относительно нее на угол 90° друг к другу. Набор из четырех верхних пружин *3* этого модуля выбирают в качестве рабочего, и на них располагают тензорезисторы, объединенные в мостовые схемы. Оставшиеся упругие элементы позволяют верхней рамке легко смещаться относительно нижней под действием измеряемых компонент, причем в каждом рабочем элементе возникают преимущественно изгибные деформации.

Крестообразный модуль *6* датчика, предназначенный для измерения компонент F_z, M_x и M_y, не отличается от рассмотренного ранее (см. рис. 2.10), а основные выражения для определения проекций вектора сил и моментов на связанную систему координат аналогичны уравнениям описанной выше конструкции. Особенностью данного датчика является реализация этих математических зависимостей на уровне мостовых измерительных схем (рис. 2.11, *б*). А именно, пары тензорезисторов, образующие плечи мостовой схемы, выходной сигнал которой пропорционален, например, компоненте M_x (R_1; r_1; R_6; r_6), взяты с поверхностей противолежащих упругих элементов крестообразной пружины, ориентированных вдоль оси Y. Аналогичным образом из полумостов, наклеенных на противолежащих упругих элементах, образованы измерительные мостовые схемы для выделения остальных компонент F_z и M_y.

При таком способе несколько увеличивается уровень перекрестных связей между измеряемыми компонентами — до 3—5 %, что

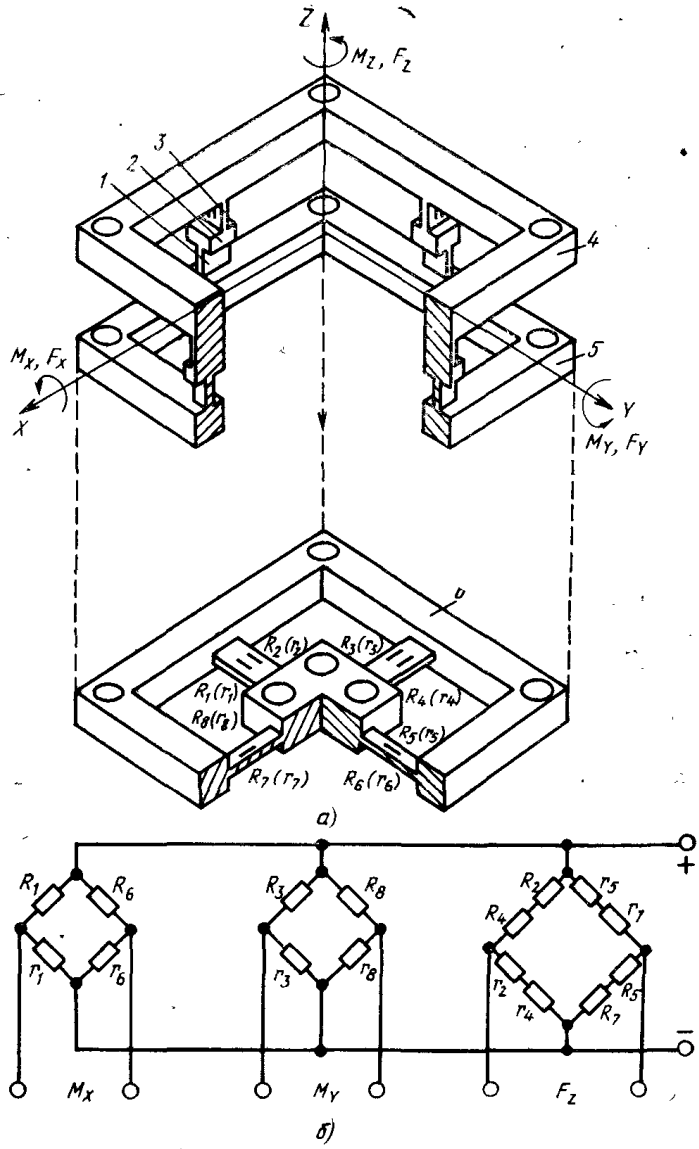


Рис. 2.11. Шестикомпонентный датчик сил и моментов с изгибными упругими элементами: *а* — конструкция; *б* — схема выделения некоторых компонент силового вектора

вполне допустимо для систем управления сборочными манипуляторами, но при этом отпадает необходимость в дополнительном электронном блоке выделения компонент. В случае тщательного изготовления силомоментного датчика, соблюдения правильной технологии наклейки, при которой тензорезисторы размещаются на противолежащих упругих элементах в точках с одинаковой деформацией, удается снизить уровень перекрестных связей до 2 %. Температурная зависимость нуля датчика при таком включении тензорезисторов оказывается не сильнее, чем аналогичная зависи-

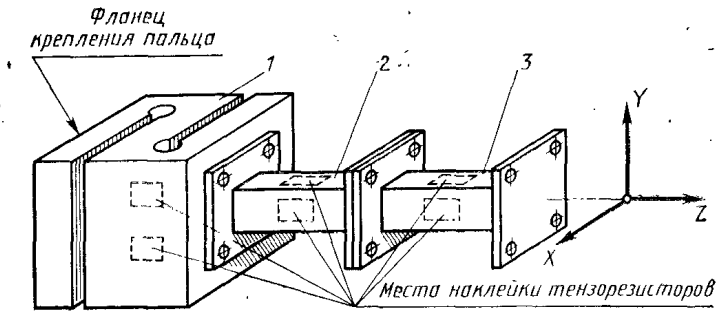


Рис. 2.12. Пятикомпонентный датчик сил и моментов

мость в устройствах с традиционным образованием тензомостов из элементов, находящихся на одном упругом элементе, поскольку размеры датчика сил и моментов малы, а отличия в температуре упругих элементов незначительны.

Примером пятикомпонентного датчика сил и моментов, размещаемого в пальце захвата, может служить устройство, показанное на рис. 2.12. Датчик обеспечивает измерение трех проекций вектора силы и двух моментов, действующих относительно осей X и Y.

Конструкция выполнена в виде двух упругих элементов *2*, *3* балочного типа квадратного сечения и упругого элемента *1* прямоугольного сечения с прорезями. На упругих элементах датчика наклеены фольговые тензорезисторы, соединенные в мостовые схемы. Для усиления сигналов тензорезистивных мостов используются интегральные усилители, выполненные по схеме модулятор—демодулятор. Экспериментальный образец датчика такой конструкции обеспечивает измерение компонент сил в диапазоне 2—100 Н и моментов в диапазоне 0,02—1 Н·м. Суммарная погрешность датчика не превышает 5 % в диапазоне температур $+(5 \div 40)$ °С.

Для непосредственного измерения вектора квазистатических сил и моментов могут быть использованы многокомпонентные датчики на основе пьезоэлектрических элементов, изготовленных из природного кварца.

Измерительный преобразователь трехкомпонентного пьезоэлектрического датчика сил и моментов представляет собой три соосных кольцевых сепаратора *3* с установленными в их гнездах кварцевыми дисками *1*, *2*, генерирующими заряд, пропорциональный деформации растяжения-сжатия или сдвига (рис. 2.13). Для увеличения чувствительности в малогабаритных датчиках сил и моментов сепаратор с дисками заменяют на сплошное кольцо, изготовленное из кварца соответствующего среза. Сепараторы с кварцевыми дисками объединяются в единую конструкцию *4* с помощью корпусных элементов, обеспечивающих также предварительное сжатие кварцевых пластин.

Преимуществом данной конструкции является ее большая жесткость и высокая собственная резонансная частота, широкий динамический диапазон, низкий уровень перекрестного взаимодействия. Например, трехкомпонентный пьезоэлектрический датчик мод. 9251

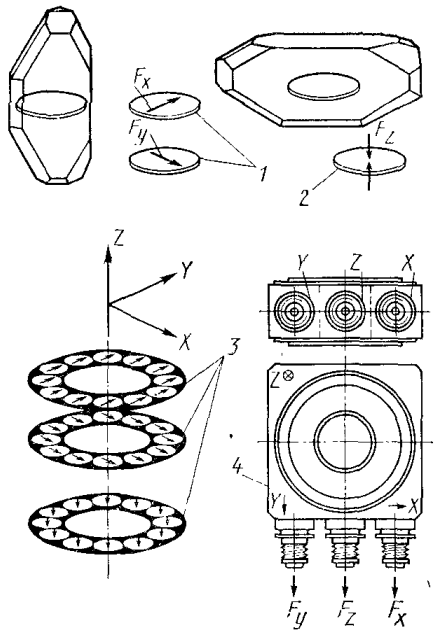


Рис. 2.13. Трехкомпонентный пьезоэлектрический датчик силы

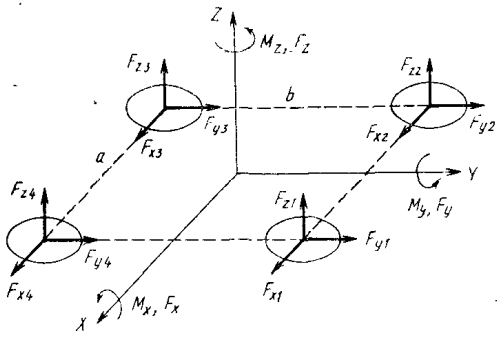
фирмы «Кистлер» (Kistler, Швейцария) обеспечивает измерение динамических и квазистатических линейных проекций вектора силы в диапазоне $\pm 5 \cdot 10^3$ Н с разрешающей способностью 10^{-2} Н; уровень перекрестного взаимного влияния не превышает 5 %, а жесткость датчика составляет 10^9 Н/м. Габаритные размеры датчика без учета размеров блока усилителей $24 \times 24 \times 10$ мм.

На основе трехкомпонентных датчиков, предназначенных для измерения линейных проекций вектора сил и моментов, можно формировать шестикомпонентные устройства по схеме, приведенной на рис. 2.14. В этом случае искомые компоненты выделяются в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{cases} F_x = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4}; \quad M_x = (F_{z1} + F_{z2} - F_{z3} - F_{z4})\dfrac{b}{2}; \\ F_y = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4}; \quad M_y = (F_{z2} + F_{z3} - F_{z1} - F_{z4})\dfrac{a}{2}; \\ F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}; \quad M_z = (F_{x3} + F_{x4} - F_{x1} - F_{x2})\dfrac{b}{2} + \\ \qquad\qquad + (F_{y1} + F_{y4} - F_{y2} - F_{y3})\dfrac{a}{2}. \end{cases}$$

Существенным недостатком силомоментных датчиков пьезоэлектрического типа, основанных на измерении заряда, пропорционального действующим силам, является возможность их применения только для определения динамических и квазистатических сил и моментов.

Представителем другой группы силомоментных средств очувствления, у которых компоненты силового вектора предварительно преобразуются в перемещение калиброванных пружин, а затем измеряются датчиками микроперемещений, является четырехкомпонентный датчик, состоящий из механического центрирующего устройства (рис. 2.15), имеющего пять степеней подвижности, и датчиков перемещения его подвижных частей. Измерение линейных и угловых перемещений центрального стержня в некоторой плоскости осуществляется парой датчиков линейных перемещений. Искомое линейное перемещение находится как сумма выходных сигналов этих датчиков, взятая в некотором масштабе, а искомое угловое переме-



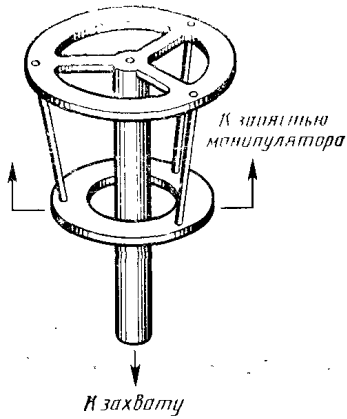


Рис. 2.14. Схема шестикомпонентного датчика сил и моментов на основе трехкомпонентных пьезоэлектрических датчиков силы

Рис. 2.15. Схематическое изображение механического центрирующего устройства

щение выражается разностью выходных сигналов указанных датчиков, деленной на расстояние между ними.

Углы между парами датчиков перемещения для упрощения дальнейшей обработки сигналов обычно выбирают равными 90°. Датчик сил и моментов, схематически показанный на рис. 2.16, обеспечивает измерение четырех проекций вектора сил и моментов F_x, F_y, M_x и M_y относительно системы координат, помещенной в фокус механического центрирующего устройства. Значения искомых компонент определяют согласно соотношениям, которые с учетом обычных допущений, принятых ввиду малости углов, выглядят следующим образом:

$$F_x = c_1 \left[\frac{L(x_1 - x_2)}{l} + x_2 \right];$$

$$M_x = c_3 \frac{y_2 - y_1}{l};$$

$$F_y = c_2 \left[\frac{L(y_1 - y_2)}{l} + y_2 \right];$$

$$M_y = c_4 \frac{x_1 - x_2}{l};$$

где c_i — коэффициенты линейной и угловой жесткости по различным координатам; x_i и y_i — значения перемещений, регистрируемые датчиками.

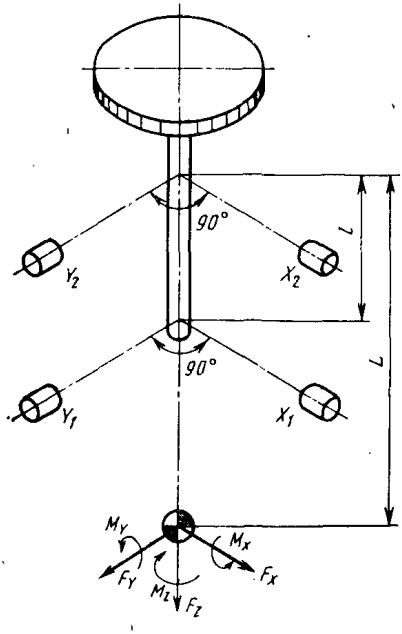


Рис. 2.16. Четырехкомпонентный датчик сил и моментов на основе механического центрирующего устройства

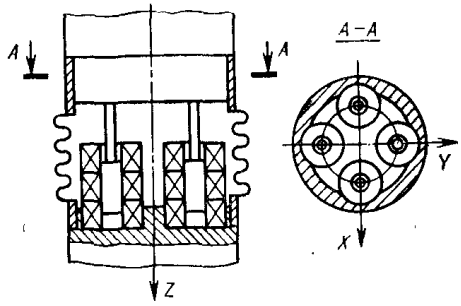


Рис. 2.17. Трехкомпонентный электромагнитный датчик сил и моментов

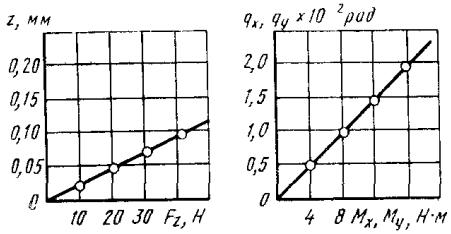


Рис. 2.18. Зависимость перемещения от нагрузки

При реализации таких устройств в качестве датчиков положения предлагается использовать потенциометры, дифференциальные трансформаторы, дискретные светочувствительные матрицы, магнитные и вихретоковые преобразователи и аналоговые светочувствительные детекторы.

Простой трехкомпонентный электромагнитный датчик сил и моментов показан на рис. 2.17. Силовое воздействие на датчик преобразуется в перемещения четырех дифференциальных трансформаторов с помощью сильфона, являющегося одновременно упругим элементом и корпусом датчика. Проекции вектора сил и моментов на связанную систему координат определяют в соответствии с выражениями

$$F_z = -c_1 z = -c_1 \frac{(z_1 + z_2 + z_3 + z_4)}{4};$$

$$M_x = c_2 q_x = c_2 (z_3 - z_1);$$

$$M_y = c_2 q_y = c_2 (z_2 - z_4),$$

где q_x, q_y и z — соответственно угловые и линейные перемещения силомоментного датчика; z_i — перемещения дифференциальных трансформаторов; c_1 — жесткость сильфона в осевом направлении; c_2 — жесткость сильфона в радиальном направлении.

Графики зависимости угловых и линейных перемещений силомоментного датчика от действующей силы (рис. 2.18, *а*) и момента (рис. 2.18, *б*) имеют линейный характер.

Основное преимущество использования дифференциальных трансформаторных датчиков заключается в простоте гальванической развязки питающей и сигнальной обмоток. Кроме того, они обеспечивают достаточный выходной сигнал без применения усилителей.

Недостатком силомоментного датчика с дифференциальными трансформаторами является высокий уровень перекрестного взаимовлияния между каналами измерения компонент, достигающий 15 %, за счет естественного разброса параметров трансформаторных датчиков. Однако в ряде практических случаев, например, при абразивной зачистке деталей с помощью манипулятора, где не

требуется высокая степень разделения действующих компонент вектора сил и моментов, такие датчики могут быть с успехом использованы.

2.3. Датчики тактильного очувствления

Тактильные датчики, имитирующие осязательную способность руки человека, были одними из первых средств очувствления роботов в связи с их простотой и доступностью.

Круг задач, решаемых с помощью тактильных систем очувствления, может быть охарактеризован следующими операциями: обнаружение контакта с объектом; определение координат и площади контактного пятна; измерение силы сжатия захвата, регистрация распределения силового воздействия по площади пальцев; определение ориентации объекта, зажатого в захвате; обнаружение направления проскальзывания и измерение смещения предмета; определение механических свойств предметов по степени их деформации; распознавание объектов из заданного класса по их тактильному образу.

Следует отметить, что применение тактильных датчиков особенно актуально для дистанционных промышленных роботов, где они используются как дополнительные сенсорные системы, помогающие человеку-оператору выполнить поставленную манипуляционную задачу при отказе основного визуального канала получения информации или плохой видимости объекта работ.

По характеру измеряемых параметров взаимодействия захвата с объектом манипулирования тактильные датчики можно разделить на три группы: датчики касания, датчики контактного давления и датчики проскальзывания.

Датчики касания и давления предназначены для измерения одной и той же физической величины — действующей силы. Различие заключается в том, что первые из них имеют порог срабатывания и являются по существу релейными датчиками сил, настроенными на заданное значение измеряемого параметра. Датчики касания и давления могут быть выполнены в виде отдельных элементов или в виде матрицы с высокой плотностью размещения элементов. Отдельные датчики обычно размещаются на внешних поверхностях захвата. Силовводящие элементы этих датчиков имеют форму пластин и покрывают всю внешнюю поверхность пальцев и некоторые другие выступающие поверхности захвата.

Матрицы датчиков давления и датчиков касания устанавливают на внутренней поверхности пальцев захвата. Регистрация прикосновения или измерение давления в местах контакта пальцев захвата с поверхностью объекта обеспечивает возможность его опознавания, определения ориентации относительно захвата, силы сжатия захвата и фиксации проскальзывания объекта относительно пальцев. В последнем случае используют также специальные датчики проскальзывания.

Особенность эксплуатации тактильных датчиков заключается в необходимости их непосредственного контакта в процессе работы

(часто в агрессивных средах и при повышенных температурах) с различными объектами, в том числе с препятствиями, возникающими на пути движения захвата. Поэтому к ним, кроме обычных, предъявляется целый ряд специальных требований: тактильные датчики должны иметь высокую надежность, прочность, износостойкость, пыле- и влагозащищенность, обеспечивать высокую стойкость к механическим и температурным перегрузкам и др. Выполнение этих требований в значительной степени зависит от выбора типа чувствительного элемента, в качестве которых, кроме перечисленных выше тензорезисторных, пьезоэлектрических, электромагнитных, емкостных и магнитоупругих преобразователей, могут применяться различные микровыключатели, струйные пневматические элементы, электропроводящие полимеры и углеродные волокна.

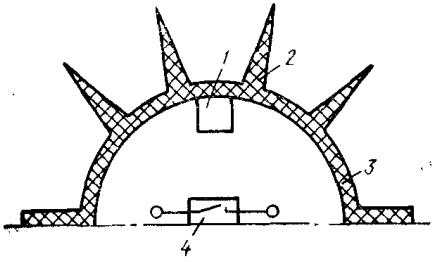
Наличие упругого элемента, сложная технология изготовления и высокая стоимость являются основными причинами, по которым тензорезисторные чувствительные элементы не нашли широкого применения при создании тактильных датчиков.

Пьезоэлектрические преобразователи, предназначенные для измерения квазистатических сил, находят применение пока только при конструировании датчиков проскальзывания. Основные трудности их использования в тактильных датчиках связаны с необходимостью усиления сигнала, пропорционального заряду, что при большом числе датчиков давления, размещаемых на захвате, трудно осуществимо в реальном масштабе времени. Перспективным является конструирование тактильных датчиков и матриц на основе пьезокерамических трансформаторов.

Электромагнитные, емкостные и магнитоупругие преобразователи достаточно редко применяют для тактильного очувствления захвата промышленных роботов. Однако они могут оказаться необходимыми для роботов, функционирующих в экстремальных средах, в особенности для подводных и космических роботов, а также для манипуляторов, обслуживающих атомные и ядерные энергетические установки.

Тактильные датчики на основе микропереключателей и других контактных устройств, имеющих заданный порог срабатывания, отличаются простотой конструкции, простотой схем детектирования и обработки сигнала, а также низкой стоимостью. Недостатком таких датчиков является необходимость периодической проверки работоспособности контактов, в особенности при коммутировании значительных токов, и сравнительно низкий ресурс работы.

Для примера на рис. 2.19 приведена схема тактильного датчика касания для очувствления захвата подводного манипулятора. Корпус датчика, состоящий из мембраны *3* и усов *2*, выполнен из эластичного материала — вулканизированной резины. Деформация любого из усов при касании препятствия передается мембране. Постоянный магнит *1*, закрепленный на ее внутренней стороне, перемещается и вызывает срабатывание геркона *4*. Благодаря эластичности усов перемещение захвата в направлении сработавшего датчика на участке торможения манипулятора не вызывает смещения или повреждения



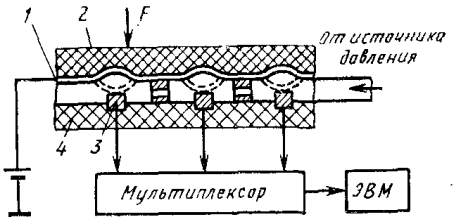


Рис. 2.19. Датчик касания

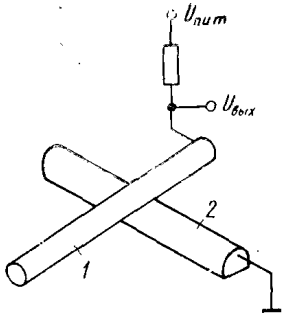
Рис. 2.20. Матрица датчиков касания:
1 — стальная пластина; *2* — упругое покрытие; *3* — электрический контакт; *4* — диэлектрическая подложка

объекта. Порог срабатывания датчика составляет 0,15—0,20 Н.

Другим примером применения контактных чувствительных элементов является матрица тактильных датчиков касания, установленных с высокой плотностью с межцентровым расстоянием 2,5 мм. Полусферические мембраны в тонкой стальной пластине (рис. 2.20) образуют матрицу с шагом приблизительно 2,5 мм. Каждая сферическая мембрана имеет два устойчивых положения — выгнутое и вогнутое. При отсутствии контакта с объектом давление воздуха, подаваемое в пальцы манипулятора, держит мембраны в первом устойчивом положении. Когда пальцы касаются объекта, сферические мембраны деформируются и переходят во второе устойчивое положение, замыкая контакт. Порог срабатывания одной мембраны не превышает 0,5 Н.

Необходимость получения высокой разрешающей способности датчиков тактильного очувствления по полю при одновременом удовлетворении указанных выше требований обусловила применение новых материалов для чувствительных элементов, ранее не используемых в робототехнике. Первоначальные эксперименты проводились с использованием порошкообразного графита в различных матричных формах. Однако для практических целей порошкообразный графит не пригоден, так как поглощение влаги и газов этим материалом может значительно изменить резистивные характеристики элемента, приводя в наихудшем случае к слипанию порошка.

Поиск более надежных материалов привел к появлению тактильных датчиков давления на основе эластомеров и композиционных материалов с волокном из графита. Конструкция датчика из проводящего электрический ток силиконового каучука предельно проста. Два электрода размещают таким образом, что под действием давления, прикладываемого к собранному из них датчику, электроды прижимаются друг к другу. Один из электродов (или оба) изготовляются из электропроводящего силиконового каучука. Одновременно одному проводнику (или обоим) придается выпуклая форма (рис. 2.21). Когда датчик находится в ненапряженном состоянии, площадь контактного пятна электродов минимальная, а контактное сопротивление оказывается достаточно большим. Под влиянием внешнего давления каучук деформируется, что вызывает резкое



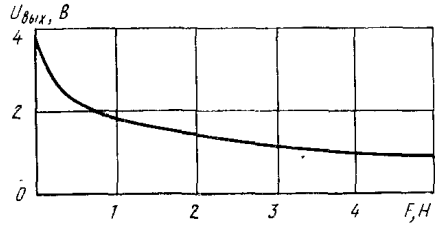


Рис. 2.21. Тактильный датчик из эластомера:
1 — металлический электрод; *2* — шнур из силиконового проводящего каучука

Рис. 2.22. Выходные характеристики эластомерного тактильного датчика

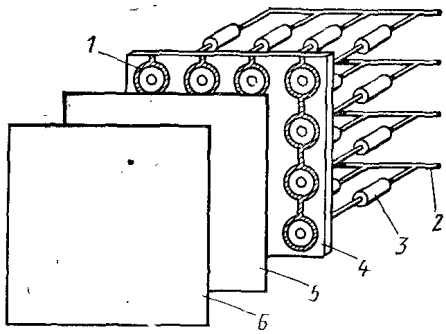
понижение сопротивления контакта. График типичной зависимости выходного сигнала $U_{вых}$ датчика от действующей силы показан на рис. 2.22. Нетрудно видеть, что выходное напряжение имеет характеристику, близкую к экспоненциальной, которая, как правило, и является желаемой характеристикой.

Конструкция тактильной матрицы размерностью 4×4, в которой используется проводящий силиконовый каучук, показана на рис. 2.23. Эластомер *5* расположен поверх печатной платы *4*, на которой вытравлено шестнадцать пар концентрических проводников. Каждая пара вместе с находящимся над ней участком проводящего силиконового каучука составляет тактильный элемент.

Внешние кольца *1* соединены по четыре и образуют четыре столбца матрицы. Центральные проводники тактильных датчиков с помощью диодов *3* соединены в четыре строки *2*. Эластомер прикрепляется к плате с помощью пластиковой пленки *6*, которая предохраняет его от воздействия внешней среды.

Эластомер электрически эквивалентен переменному резистору, который соединен последовательно с внешним постоянным резистором. Тактильные элементы образуют делитель напряжения, выходной сигнал которого изменяется в зависимости от деформации эластомера.

По своей природе материал эластомера представляет собой силиконовый каучук, смешанный с различными металлами или их соединениями, например с медью. На рис. 2.24 показана зависимость удельного сопротивления ρ образцов эластомеров двух типов от внешнего давления P. Материал типа 1 более пригоден для создания тактильных датчиков релейного действия, так как для него характерно быстрое уменьшение удельного сопротивления при увеличении давления от нуля до 30 кПа (кривая *1*). Дальнейший рост давления приводит к незначительному изменению удельного сопротивления, и оно остается постоянным на уровне около 10 кОм·м. Эластомер типа 2 имеет практически экспоненциальную зависимость сопротивления от давления (кривая *2*).



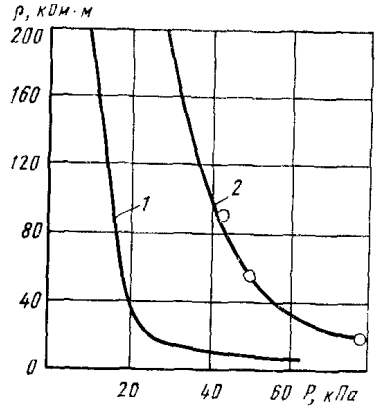


Рис. 2.23. Пропорциональная тактильная матрица на основе проводящего силиконового каучука:

1 — кольцевые элементы матрицы, образующие столбцы; *2* — элементы матрицы, образующие строки; *3* — диоды; *4* — печатная плата; *5* — эластомер; *6* — защитная пластиковая пленка

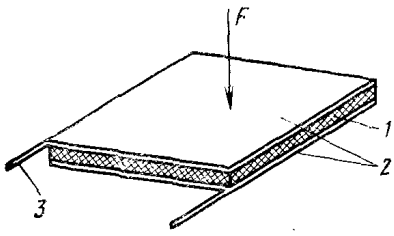
Рис. 2.24. Зависимость удельного сопротивления от нагрузки для проводящего силиконового каучука

Основной недостаток эластомеров заключается в появлении усталостных изменений в материале, что выражается в образовании микротрещин и приводит к резкому падению удельной проводимости эластомера, вследствие чего он выходит из строя.

В силу существенно нелинейных характеристик и очень ограниченной зоны пропорциональности силиконовый каучук с наполнителем в виде графитового или металлического порошка целесообразно использовать для тактильных датчиков, когда не требуется высокая разрешающая способность по давлению, а также в датчиках касания.

В качестве материала для тактильных датчиков могут быть использованы углеродные нити, каждая из которых представляет собой пучок, содержащий до нескольких тысяч волокон диаметром от 7 до 30 мкм. Электрическое сопротивление контакта в месте пересечения двух нитей имеет большое значение, вследствие высокой чистоты материала. Изменение сопротивления под действием нагрузки носит плавный характер, что объясняется суммарными свойствами отдельных контактирующих волокон. Таким образом, электрическая проводимость пересечений определяется числом контактов между волокнами. Уровень микрофонного или сейсмического шума такого множественного контакта оказывается довольно низким, так как возникшие контакты весьма устойчивы, а процент ненадежных контактов невелик, причем уровень помех тем ниже, чем больше волокон в каждом пучке. Это объясняется усреднением влияния абсолютного числа соединений.

Электрический контакт ненагруженного пересечения двух пучков размером 0,5×0,5 мм (под действием собственной массы) имеет сопротивление порядка 2 кОм, а уровень помех составляет примерно 5 % номинального сопротивления. При приложении нагрузки



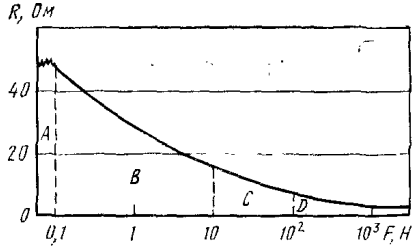


Рис. 2.25. Углеволоконный тактильный датчик:
1 — слой угольных волокон; *2* — фольговые электроды; *3* — электрические контакты

Рис. 2.26. Зависимость сопротивления *R* углеволоконного датчика площадью 5 см² от нагрузки:
A — область сейсмических и микрофонных шумов; *B* — область, в которой уплотнение волокон увеличивает число путей для протекания тока; *C* — область искривления волокон; *D* — область, в которой вследствие деформации волокон увеличивается площадь их контакт

в 10 Н сопротивление падает до 1 кОм, а уровень помех уменьшается до 0,5 %.

Признаки повреждений пучков углеродных нитей наблюдаются начиная с давлений порядка 400 МПа, поэтому углеволоконные датчики целесообразно использовать при контактных давлениях, не превышающих 200 МПа. Рассматриваемые тактильные датчики имеют малый гистерезис, который не превышает 1 %.

Конструктивно тактильный преобразователь из углеродного волокна может быть оформлен как кусок ткани, выполненной из параллельно расположенных четырехмиллиметровых чередующихся нитей стекловолокна и графита, поперечно переплетенных стекловолокном. Два кусочка такой ткани накладывают один на другой так, что включенные в них волокна графита пересекаются под прямым углом, образуя тактильную пропорциональную матрицу.

Другой удобной формой материала для тактильных углеволоконных датчиков является «войлочная» структура (рис. 2.25). Углеродные пряди разделяются на отрезки длиной около 2,5 мм, укладываются в форму и уплотняются. Полученный материал не имеет механической структуры. Его номинальная толщина 1 мм. Сопротивление ненагруженного элемента площадью 1 см² составляет около 200 Ом. Из этого материала можно вырезать тактильные элементы различной формы: шайбы, прямоугольные или квадратные пластины и т. п. Нагрузочная характеристика одного из образцов тактильного датчика на основе углеродных волокон показана на рис. 2.26.

Недостаток углеродного волокна как материала для тактильных датчиков заключается в сложности присоединения к матрице электрических контактов. Однако пути устранения этого недостатка достаточно очевидны — использование механических соединений обжатием волокна электрическим проводником и применение различных отверждающих проводящих клеевых соединений.

Отдельную группу тактильных датчиков составляют датчики проскальзывания предмета в захвате. Необходимость в этих датчиках возникла в связи с применением роботов для манипулирования хрупкими объектами или предметами с легко повреждаемой поверх-

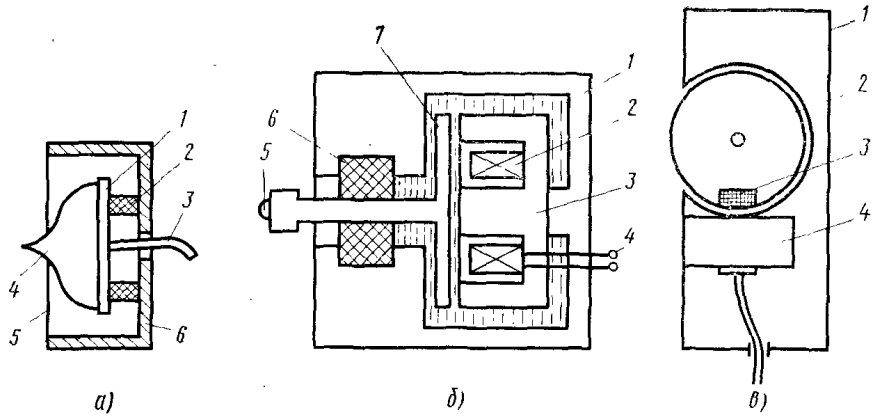


Рис. 2.27. Датчики проскальзывания:

а — кристаллический; *1* — кристалл рошелевой соли; *2* — резиновый демпфер; *3* — выход датчика; *4* — сапфировая игла; *5* — металлическая мембрана; *6* — корпус; *б* — электромагнитный; *1* — масляный демпфер; *2* — катушка индуктивности; *3* — магнит; *4* — выход датчика; *5* — стальной шарик; *6* — резиновый демпфер; *7* — подвижный магнитопровод; *в* — магнитный; *1* — палец захвата; *2* — резиновый ролик; *3* — магнит; *4* — магнитная головка

ностью. Информация о проскальзывании необходима для управления силой сжатия захвата и поддержания ее на таком минимальном уровне, при котором объект еще надежно зажат и в то же время сила сжатия недостаточна для его разрушения. Установить такой минимально допустимый уровень можно, используя датчики силы сжатия захвата, однако в этом случае необходимо априорно знать абсолютное значение силы сжатия, которое требуется развить на захвате.

Известны три способа определения смещения объекта относительно губок захвата: измерение вибраций, возникающих при проскальзывании; преобразование линейного перемещения объекта во вращательное движение импульсного датчика угла поворота; определение градиента изменения давления между губками захвата.

Некоторые варианты конструктивных решений датчиков проскальзывания, в которых реализуются первые два способа преобразования, показаны на рис. 2.27.

Измерение проскальзывания с помощью фотоэлектрического импульсного датчика углового положения также находит применение в реальных тактильных датчиках, однако матрицы тактильных датчиков являются наиболее универсальной конструктивной формой для очувствления внутренних поверхностей губок захвата манипулятора, причем в ряде случаев вполне достаточным оказывается применение релейных матриц датчиков касания.

Наиболее перспективны датчики, в которых совмещаются различные виды очувствления: локации, касания, проскальзывания и т. п. — в единой конструкции.

Необходимость создания таких устройств обусловлена рядом факторов:

отсутствием места на захвате адаптивного робота для размещения нескольких тактильных датчиков, реализующих только одну функцию;

целесообразностью сокращения номенклатуры датчиков, устанавливаемых на роботе;

упрощением алгоритма управления движением захвата (как результат).

Примером может служить многофункциональный тактильный датчик с подвижным элементом в виде ролика, в котором используется единый электромагнитный чувствительный элемент. Датчик обеспечивает формирование сигналов о приближении захвата к объекту, касании с ним и о проскальзывании объекта в захвате. Он отличается безынерционностью, работоспособностью в условиях загрязненности и агрессивных сред; возможностью использования длинных кабельных линий передачи от датчика к вторичному преобразователю; высокой механической прочностью чувствительного элемента и простотой конструкции.

Для формирования сигналов о приближении и касании объекта используется вихретоковый преобразователь накладного типа, работающий в диапазоне от 0 до 5 мм. В случае проскальзывания объекта манипулирования относительно захвата происходит поворот ролика рассматриваемого датчика, который регистрируется с помощью эксцентрика и второго накладного вихретокового преобразователя. Максимальный поворот ролика, а следовательно, и эксцентрика составляет 180°. Максимальное смещение проскальзывающего объекта, фиксируемое датчиком, 25 мм, габаритные размеры $40 \times 30 \times 20$ мм при допустимой погрешности измерения зазора ± 5 % и частоте генератора вихретоковых преобразователей 1 МГц.

Глава 3

ЛОКАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ АДАПТИВНЫХ РОБОТОВ

3.1. Классификация локационных датчиков

Система очувствления промышленного робота методами локации, являющаяся одной из сенсорных систем восприятия информации о свойствах и состоянии объектов манипулирования и внешней среды, позволяет обеспечить целенаправленные движения робота.

Посредством датчиков локации обеспечивается измерение таких параметров, как расстояние до объектов, скорость движения, их размеры, обнаружение препятствий, а также исследование механических, электрофизических, акустических и других параметров объектов. В качестве дополнительных параметров измерения могут выступать зазоры, перекосы, проскальзывание, наличие внутренних дефектов, толщина материала или покрытия, твердость, напряжения, площадь, ориентация относительно реперной точки или осей и многие другие.

Измерительная информация локационных систем получается и преобразуется на основе ряда физических методов преобразования: акустических, магнитных, оптических, радиационных, радиоволновых, тепловых, электрических, электромагнитных, пневматических (рис. 3.1).

На базе этих методов для локационных систем очувствления проводят разработку и усовершенствование многих типов преобразователей, в том числе вихретоковых, пьезоэлектрических, полупроводниковых, электронно-оптических твердотельных матриц, струйных, волоконно-оптических, феррозондовых, индукционных, стереоскопических дальномерных, угломерных, датчиков близости и т. п.

В перспективе на промышленных роботах будет применяться комплекс датчиков различного принципа действия, в которых широко используется весь спектр электромагнитного излучения, ультразвук, тензометрия, фотоэлектрические и другие методы получения и преобразования информации.

В общем случае под термином «локационный датчик» подразумевают устройство, состоящее из первичного преобразователя, измеряющего путем излучения и приема сигналов некоторые физические параметры объектов среды, усилителя, аналого-цифрового преобразователя, индикатора, а также в случае необходимости — микропроцессора, цифроаналогового преобразователя и специали-

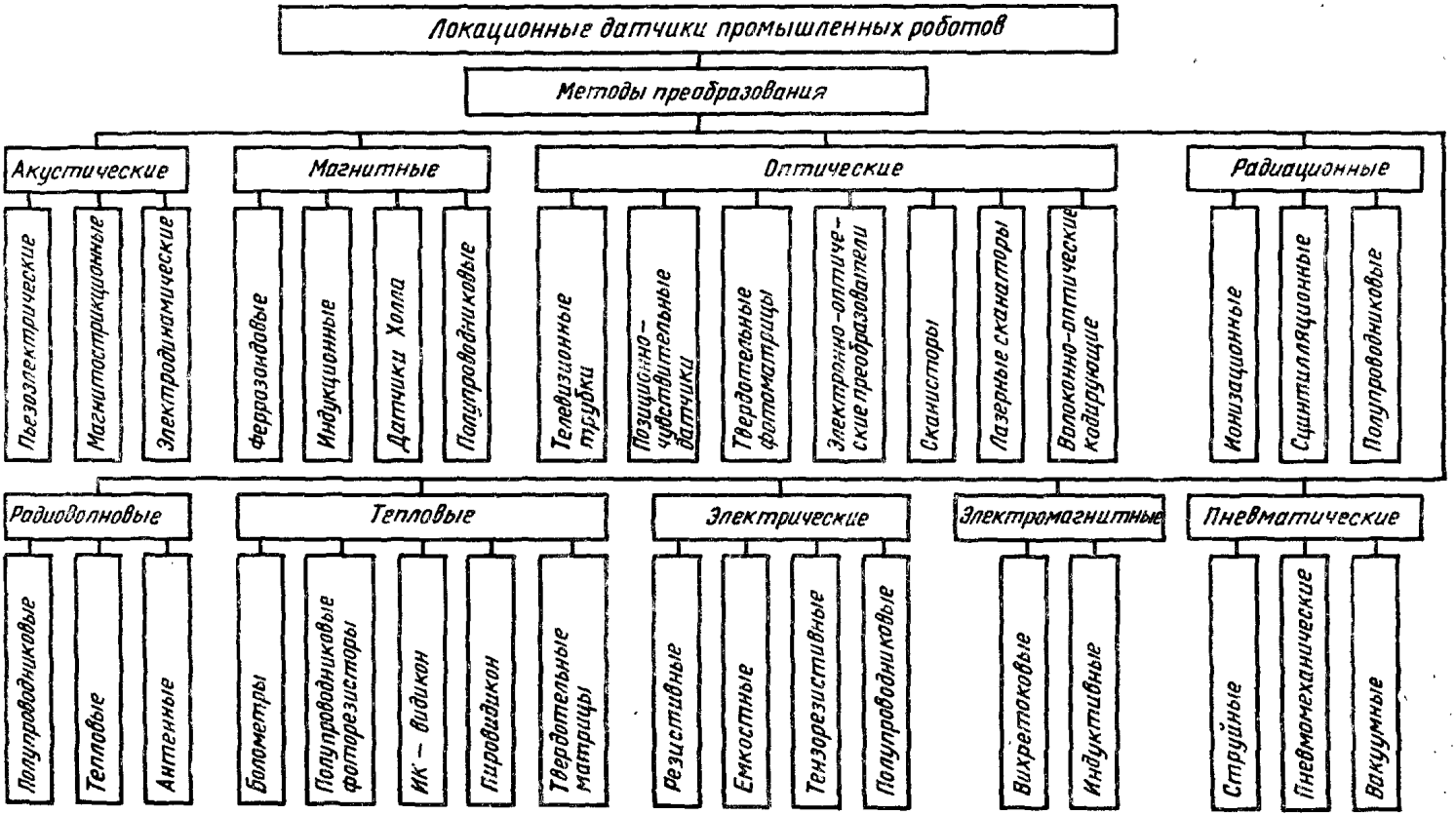


Рис. 3.1. Классификация локационных датчиков по методам преобразования измерительной информации

зированной ЭВМ для обработки и представления информации, передаваемой в систему управления робота или роботизированного технологического комплекса. В качестве аналого-цифрового преобразователя может быть использован АЦП ЭВМ или системы управления.

Рассматриваемые датчики по своему назначению могут быть разделены на информационные локационные датчики для формирования управления роботом и локационные датчики безопасности, используемые для защиты исполнительного органа от столкновения с посторонними предметами.

Информационные локационные датчики могут быть также использованы для определения положения объекта в пространстве относительно выбранной системы координат.

Локационные датчики безопасности представляют собой упрощенную модификацию информационной локационной системы, работающей в релейном режиме и формирующей сигналы об объектах типа «да — нет». В качестве датчиков безопасности применяют также дальномеры, сигналы с которых поступают на пороговое устройство, причем порог срабатывания может изменяться в процессе работы робота.

3.2. Акустические локационные датчики

Акустический метод основан на способности упругих волн высокой частоты (более 20 кГц) распространяться в жидких, газообразных и твердых средах и отражаться от неоднородностей сред.

Из известных акустических методов для применения в робототехнике наиболее перспективны эхометод и метод, использующий эффект Доплера.

Эхометод основан на излучении в среду коротких акустических импульсов и приеме эхосигналов от неоднородностей среды или находящихся в ней предметов. Он пригоден для обнаружения предметов, измерения расстояний и перемещений, его также используют для СТЗ.

Метод, основанный на эффекте Доплера, позволяет измерять скорость перемещения объектов или рабочих органов робота. При этом скорость преобразуется в изменение частоты упругих колебаний, которая и измеряется аппаратурой.

Для излучения и приема ультразвуковых колебаний используют в основном керамические пьезоэлектрические преобразователи, реже (на частотах до 60—70 кГц) — магнитострикционные. В качестве приемников акустических колебаний относительно низких частот (до 50 кГц) в воздушной среде применяют также конденсаторные микрофоны. Наиболее просты, дешевы и удобны пьезоэлектрические преобразователи, надежно работающие в диапазоне частот от нескольких килогерц до 20—30 МГц и в широком интервале температур.

Основные характеристики акустических локационных датчиков в большой степени зависят от частоты упругих колебаний. Поэтому

для повышения таких параметров, как разрешающая способность и минимальные значения измеряемых расстояний, перемещений и скоростей, рабочую частоту целесообразно увеличивать. Однако с увеличением частоты растет затухание ультразвуковых волн и соответственно уменьшается дальность действия.

Акустические локационные датчики имеют преимущества перед оптическими датчиками и при работе в газовой среде, и в условиях, затрудняющих или исключающих применение оптических средств (сильно задымленный воздух, наличие пара, оптических помех от электросварки и т. п.). С помощью акустических датчиков могут быть обнаружены внутренние дефекты в изделиях, измерены их толщина и акустические характеристики материала. В отличие от оптических, акустические датчики дают возможность идентифицировать материал поверхности объектов посредством измерения акустических параметров. При достаточно высокой точности измерения расстояний и геометрических параметров объектов они позволяют сравнительно простым программным путем в режиме «реального времени» получить интегральную оценку формы поверхности, например, измерить угол наклона ее отражающего участка, а также провести классификацию объектов.

Акустический метод локации обеспечивает получение простыми средствами технических характеристик датчиков и параметров измерения в следующих пределах:

расстояние, линейное перемещение — диапазон в воздухе 2—2000 мм, в воде 0,5—10 000 мм, погрешность 2 %;

скорость перемещения — в воздухе от 2 мм/с, в воде — от 10 мм/с, погрешность 2 %;

вибрация — в воздухе от 2 мм/с, в воде — от 10 мм/с.

Работа акустических локационных датчиков в общем виде заключается в следующем. Зондирующие импульсы формируются генератором и через коммутирующее устройство поступают на излучающий преобразователь. Излученные преобразователем ультразвуковые импульсы распространяются до объекта и, отразившись от него, поступают на приемный преобразователь (возможно применение одного преобразователя, работающего в совмещенном режиме). Принятый сигнал подвергается предварительной аналоговой обработке, а затем преобразуется в цифровой код. Пройдя блок цифровой обработки, полученная информация заносится в буферную память, из которой в нужный момент времени она может быть передана через интерфейсный блок в управляющую ЭВМ или непосредственно в исполнительное устройство.

В США создан акустический локационный датчик, предназначенный для очувствления сборочного робота. Режим работы датчика — импульсный, несущая частота ультразвука 270 кГц, максимальная дальность действия 3 м. Достаточно высокая частота ультразвуковых колебаний, а также применение одинаковых приемного и излучающего преобразователей, обладающих узкими диаграммами направленности, обеспечивают высокие разрешающую способность датчика и точность измерения. Указанный локационный датчик

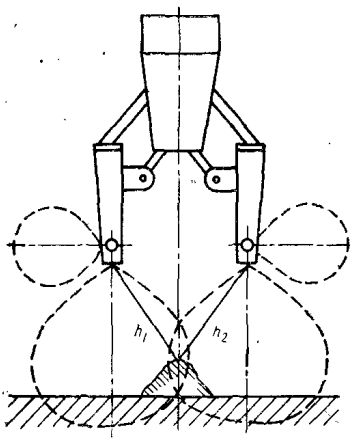


Рис. 3.2. Расположение акустических датчиков на захвате манипулятора с локальным наведением

может быть использован не только для измерения расстояний, но и для получения информации о пространственной конфигурации объектов посредством сканирования преобразователя, запоминания полученной информации и обработки ее на ЭВМ. На основании этой информации осуществлялась классификация объекта и определялась его ориентация путем сравнения вычисляемых в результате обработки сигналов площади, кривизны и главного момента инерции объекта с аналогичными характеристиками, записанными в памяти ЭВМ.

На сборочном роботе «Тральфа» (Норвегия) в качестве датчиков безопасности используются ультразвуковые локационные датчики. Эти датчики, устанавливаемые в пальцах захвата, обеспечивают автоматическую приостановку движения и возврат захвата робота при его приближении к препятствию на расстояние, меньшее допустимого. Датчики имеют диаграмму направленности шириной около 70° на частоте 40 кГц.

В СССР разработан ряд акустических локационных датчиков для адаптивных роботов. Принцип действия одного из них заключается в акустической локации пространства вблизи захвата робота.

Пример расположения датчика на захвате показан на рис. 3.2. На каждом из двух пальцев имеется по четыре датчика. Два торцовых датчика, помимо измерения расстояния до объекта, позволяют в некоторых случаях решить задачу наведения и точной установки оси захвата над объектом. Эти датчики образуют стереопару. При уравнивании расстояний h_1 и h_2 ось захвата совмещается с осью объекта (для объектов правильной формы).

Функциональная схема рассматриваемого датчика приведена на рис. 3.3. Генератор *3* вырабатывает одиночные короткие импульсы высокого напряжения. Эти импульсы через коммутирующее устройство *2* поступают на ультразвуковой преобразователь *1*, представляющий собой разновидность конденсаторного микрофона. Под действием электрического поля мембрана преобразователя излучает в воздух ультразвуковой импульс, который после отражения объекта возвращается и воспринимается тем же преобразователем. Усиленный предварительным усилителем *4* (размещенным в пальце захвата) принятый импульс еще раз усиливается в усилителе-формирователе *5* и поступает на преобразователь *6*, формирующий частотно-модулированный сигнал. На выходе преобразователя *6* получается импульс, длительность которого пропорциональна расстоянию до объекта. Этот сигнал может быть использован непосредственно как выходной параметр датчика. Кроме того, предусмотрена

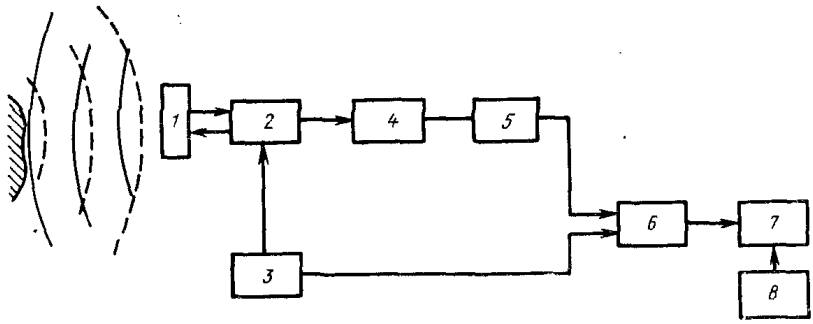


Рис. 3.3. Функциональная схема акустического датчика локального наведения манипулятора (штриховой линией показаны элементы, встроенные в захват)

схема сравнения расстояния с двумя пороговыми значениями. Порог сравнения определяется длительностью импульсов эталонного генератора *8*, с которыми сравниваются информационные импульсы в устройстве *7*.

Диапазон измеряемых датчиком расстояний 10—300 мм, погрешность измерений порядка нескольких процентов, частота излучения 35 кГц, ширина диаграммы направленности около 60°.

В робототехнике находят применение ультразвуковые устройства, в которых используется принцип «стереофонической» ультразвуковой локации. Один из вариантов подобного устройства содержит два идентичных канала измерителей расстояний, каждый из которых конструктивно аналогичен описанному выше датчику. Устройство установлено на поворотном столе. Диапазон измерения расстояний 0,3—4 м, погрешность измерений ± 5 см. Излучающий преобразователь конструктивно отделен от приемных преобразователей и представляет собой электростатический микрофон, расположенный между электростатическими идентичными микрофонами-приемниками. Каждый из приемников находится в экспоненциальном канале-волноводе, где расположены также предварительные усилители. Дальнейшее усиление сигнала происходит в избирательных усилителях-формирователях. Специальное устройство сравнивает длительности модулированных импульсов с обоих каналов и в зависимости от знака рассогласования посылает тот или другой сигнал управления на электродвигатель. Двигатель через редуктор поворачивает устройство до тех пор, пока объект исследования не установится на его оси. В этом случае с датчика угла поворота снимается сигнал, определяющий координату объекта в плоскости стола.

Для увеличения информации об объекте применяют локационные датчики с так называемым информационным полем, которое представляет собой матрицу чувствительных элементов, аналогичную тем матрицам микродатчиков, которые используются в качестве устройства искусственного осязания и встраиваются в кисть или захват руки. Матрица, устанавливаемая неподвижно в рабочей зоне робота, позволяет собирать информацию о форме и взаимном расположении объектов в пределах поля чувствительности этой матрицы.

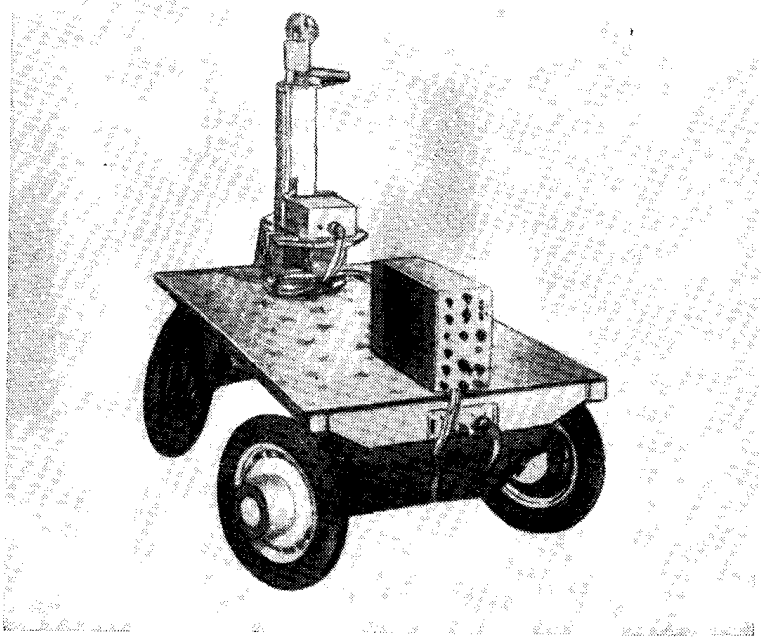


Рис. 3.4. Макет внутрицехового транспортного робота с установленным на нем ультразвуковым дальномером

Принцип действия такой ультразвуковой системы заключается в следующем. Матрично расположенные ультразвуковые преобразователи образуют информационную поверхность, на которой каждому из преобразователей приписаны координаты x и y.

Размещаемый на информационной поверхности объект перекрывает некоторое число преобразователей. Зная координаты этих преобразователей, можно получить информацию о конфигурации контура основания объекта. Очевидно, что для получения пространственной конфигурации объекта необходимо знать его высоту, т. е. координату z в каждой точке x, y, которая может быть определена также эхоимпульсным методом ультразвуковой локации.

Одной из наиболее актуальных задач научно-исследовательских работ по созданию акустических локационных систем в настоящее время является разработка датчиков, способных определить характер (акустические свойства) отражающего объекта на расстояниях до 10 м, и устройств очувствления для транспортных роботов, которые представляют собой автоматически управляемые тележки, используемые для организации гибкого производства в цехах и в складских помещениях.

Примером такого устройства очувствления может служить ультразвуковой дальномер, состоящий из конденсаторного акустического преобразователя, синхронизатора, формирователя зондирующих импульсов, устройства аналоговой обработки сигнала, преобразователя аналог—код, интерфейсного блока, обеспечивающего предварительную обработку акустических сигналов, запоминание

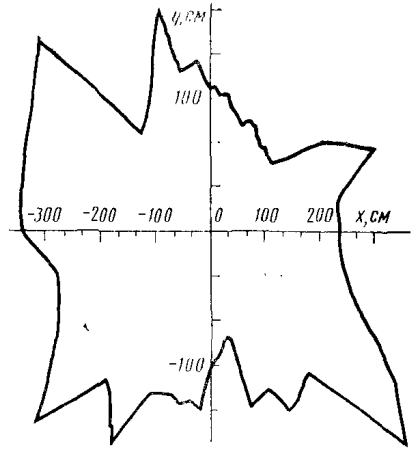


Рис. 3.5. Дальнометрическое представление в ЭВМ внешней среды адаптивного робота, полученное с помощью акустического локатора для автоматического поиска прохода транспортным роботом в условиях непрогнозированного изменения внешней обстановки

и передачу информации в ЭВМ. Диапазон измеряемых расстояний 0,3—10 мс, погрешность 1—3 %. Режим работы — импульсный с частотной модуляцией; длительность излучаемых сигналов адаптивно устанавливается в пределах от 0,1 до 10 м; частота повторения импульсов 1—10 Гц; средняя рабочая частота излучения 50 кГц; девиация частоты ± 10 кГц. Динамический диапазон усилителя огибающей акустического сигнала в устройстве аналоговой обработки составляет 70 дБ, что требует применения двенадцатиразрядного преобразователя аналог-код. Предварительная цифровая обработка сигналов заключается в цифровой фильтрации, усреднении и запоминании результатов измерения в позиционном двоично-десятичном коде.

Объем промежуточной оперативной памяти составляет 256 байт. Связь с ЭВМ осуществляется через мультиплексор датчика, передающий информацию из промежуточной памяти в виде двухбайтовых слов по команде с ЭВМ. При использовании дальномера для очувствления транспортного робота преобразователь размещается на поворотном устройстве (рис. 3.4). При вращении преобразователя вокруг своей оси на 360° датчик снимает окружающую панораму, по которой робот осуществляет поиск прохода и оценивает расстояние до объекта внешней среды. Пример такой панорамы приведен на рис. 3.5.

Ультразвук используется и для определения координат промышленного робота или отдельных его компонентов. Например, разработана система для определения трех координат цехового транспортного робота с целью обеспечения управления его движением. Принцип работы этой системы основан на измерении разности расстояний от автономного излучателя, установленного на роботе, до четырех ближайших приемников, размещенных в помещении цеха, с последующим расчетом координат. В качестве излучателя и приемников использованы пьезоэлектрические преобразователи. Режим работы — импульсный, частота излучения 40 кГц, длительность импульса 1 мс, частота повторений — переменная с возможностью управления от ЭВМ, число излучателей — 1, число одновременно подключаемых приемников — до 32.

Информация, поступающая в управляющую ЭВМ, выдается из специализированной памяти, входящей в состав интерфейсного блока, через мультиплексоры, управляемые по командам ЭВМ. В системе предусмотрен эталонный канал измерения скорости

ультразвука в среде, предназначенный для повышения точности определения координат.

Аналогичную структуру имеет ультразвуковая система для определения координат захвата робота. Различие заключается в том, что, если в системе для транспортного робота излучатель электрически не связан с блоком обработки, то в системе для захвата манипулятора генератор излучаемых импульсов запускается тактовыми импульсами, поступающими с общего блока обработки. В этом случае расчет координат осуществляется по формулам, в которые входят абсолютные значения расстояний от излучателя, расположенного на конце захвата, до трех ближайших приемников, размещенных в рабочей зоне манипулятора. В качестве излучателя и приемников использованы пьезоэлектрические преобразователи МУП-1 с рабочей частотой 40 кГц. Преимуществами данной системы являются возможность измерения координат конца захвата непосредственно в декартовых координатах, а также исключение погрешности, возникающей в датчиках, устанавливаемых в сочленениях захвата.

В качестве силовых приводов многих роботов используются гидравлические системы, включающие несколько гидроцилиндров. При автоматизации процесса управления роботом необходимо определять относительное перемещение поршня в гидроцилиндре. Эту задачу выполняет акустический датчик, состоящий из генератора излучаемых сигналов, излучающего и приемного преобразователей, устройства аналоговой обработки, преобразователя аналог—код, интерфейса и синхронизатора. Излучающий преобразователь закрепляется на поршне, а приемный вмонтирован в корпус самого цилиндра. Это обеспечивает высокую помехозащищенность системы и исключает возможность воздействия на преобразователи внешних механических нагрузок. В зависимости от конструкции гидроцилиндра может быть использован и совмещенный режим работы преобразователя.

В качестве ультразвуковых преобразователей используются пластины керамики ЦТС-19. Режим работы — импульсный, частота заполнения излучаемых импульсов 1,25 МГц, максимальное число одновременно контролируемых цилиндров 8, погрешность измерения 0,5 %, частота повторения излучаемых импульсов — переменная с возможностью управления от ЭВМ. В буферную память, входящую в состав интерфейса, заносятся результаты измерений, а также данные о скорости распространения ультразвука в зависимости от температуры и давления среды, получаемые с эталонного канала.

3.3. Оптические локационные датчики

Оптические локационные датчики основаны на эффектах взаимодействия света с поверхностью объекта (отражение, поглощение, рассеяние и т. д.) и предназначены для обнаружения объектов в рабочей зоне адаптивного робота и определения таких параметров, как координаты объекта, его герметические размеры, цвет, структура

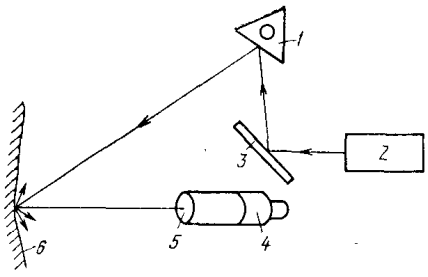


Рис. 3.6. Принципиальная схема определения расстояния с помощью луча света

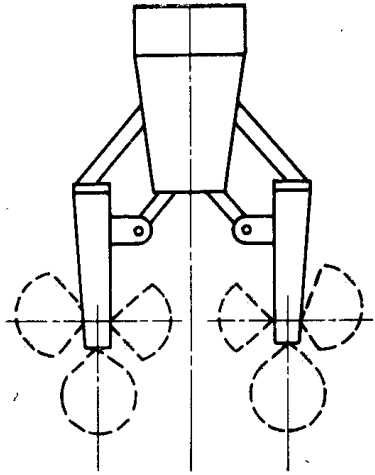
поверхности и др. Принцип определения расстояния с помощью оптического локационного датчика поясняет схема на рис. 3.6. Конденсированный световой поток от источника света *2* проецируется зеркалом *3* на вращающееся зеркало *1*. Световой поток отражается зеркалом и излучается для сканирования поверхности объекта *6*. На фиксированном направлении в стороне от зеркала *1* и на соответствующем расстоянии установлен приемник света *4*. Этот приемник имеет соответствующую систему линз *5* для приема излучения только вдоль одной линии, пересекающей поверхность объекта *6*. Так как зеркало *1* вращается с определенной частотой, фотоприемник принимает световые импульсы 3 раза за два цикла частоты. При каждом попадании зеркала *1* в начальное положение выдается сигнал запуска генератора импульсов, который вырабатывает серию импульсов синхронизации высокой частоты. Эта серия импульсов поступает на счетчик, который останавливается в тот момент, когда световой поток попадает на фотоприемник. Показание счетчика пересчитывается в угол поворота зеркала, по которому путем триангуляции определяют расстояние до объекта. Базовая длина измерения, которая представляет собой вертикальное расстояние между зеркалом *1* и фотоприемником, влияет на точность измерений. Чем больше эта базовая длина, тем выше точность измерений. Но слишком большая база вызывает уменьшение принимаемого светового потока.

Теоретическая точность определения расстояния при дискретности измерения угла перемещения зеркала 0,216° и базовой длине 10 см составила 3,2 и 1,9 мм при базовой длине в 20 см.

Оптические локационные датчики могут быть использованы как датчики безопасности и датчики обнаружения объектов. Захват с такими датчиками и схема компоновки преобразователей в захвате приведены на рис. 3.7 и 3.8. На пальцах захвата размещено 12 датчиков, которые сигнализируют о приближении захвата к объекту на расстояние 2—3 см. Датчики расположены на концах пальцев, на боковых и торцовых поверхностях.

Работа этого датчика основана на обнаружении светового потока, отраженного от объекта. Для исключения влияния внешнего освещения на работу датчика используется модулированный по интенсивности световой поток. Внешний световой поток, как правило, постоянен или по крайней мере не модулирован частотами, использованными в датчиках, поэтому влияние его сводится к минимуму.

В процессе работы робота возникает необходимость получать сведения не только о приближении или прикосновении к объекту, но и о наличии объекта внутри захвата между пальцами. Для этого на внутренней поверхности пальцев размещены еще четыре фото-



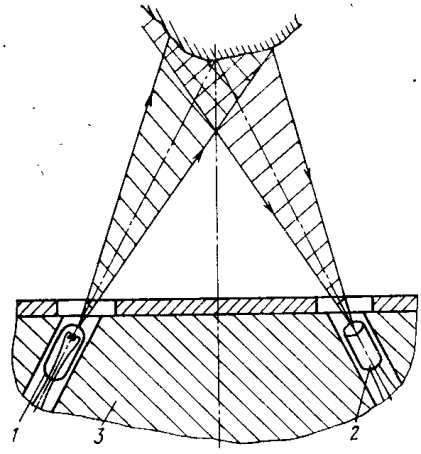


Рис. 3.7. Захват с оптическими локационными датчиками

Рис. 3.8. Схема компоновки оптических преобразователей:
1 — лампа накаливания; *2* — фотодиод; *3* — корпус

датчика, работающие не на отраженном свете, а на прямом просвечивании межпальцевого пространства. Они позволяют контролировать наличие объекта между губками, а также ориентировочно судить о его положении по площади перекрываемого потока лучей.

Однокоординатный дальномер может быть использован для получения информации о пространственной топологии сцены, если его перемещать по линейным или угловым координатам.

Как показано на рис. 3.9, конфигурация объекта может быть получена с помощью однокоординатного дальномера путем проецирования одного луча или сетки лучей из точки *2* на объект *3* и обзора или сканирования объекта из точки *1*. Обычно достаточно проецировать один луч. Эта система имеет параллакс только в направлении оси *X*. Значение параллакса прямо пропорционально дистанции. Конфигурацию объектов можно также получить, если создать растровую подсветку. Обработка изображения, полученного с помощью растра, может быть проведена методом Фурье. Анализ изображения может быть проведен как цифровыми методами, так и путем непосредственной обработки оптической информации.

Лазерные дальномеры имеют высокую точность определения координат объектов, что объясняется острой направленностью луча лазера. В таком локаторе-дальномере лазерный луч через передающую оптическую систему направляется на объект (рис. 3.10, *а*). При этом часть отраженного сигнала с помощью объектива и узкополосного оптического фильтра поступает на фотоэлектронный детектор, сигнал с фотоумножителя усиливается и измеряется. По числу импульсов, поступающих на измеритель за определенный промежуток времени, можно определить расстояние. Разработано большое число разнообразных схем лазерных дальномеров. Лазерные дальномеры с импульсной модуляцией непригодны для измерения расстояния менее 3 м, так как интервал времени между прямым

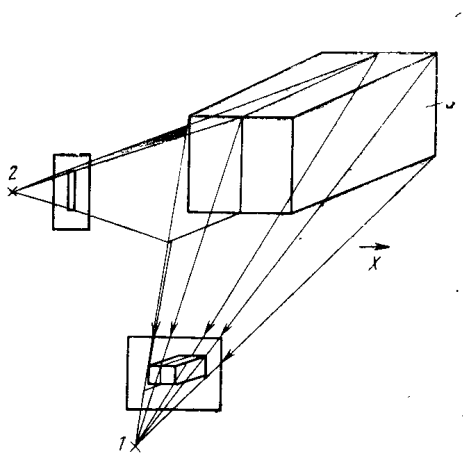


Рис. 3.9. Схема сканирования объекта

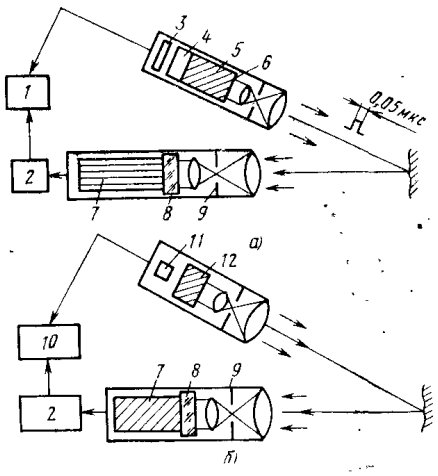


Рис. 3.10. Принципиальная схема лазерного дальномера, работающего в режимах:
а — импульсном; *б* — непрерывном; *1* — электронный счетчик; *2* — видеоусилитель; *3* — фотоэлемент; *4* — вращающийся зеркальный отражатель (модулятор); *5* — рубиновый стержень; *6* — зеркало; *7* — фотоумножитель; *8* — фильтр; *9* — диафрагма; *10* — фазометр; *11* — фотодиод; *12* — полупроводниковый лазер

и отраженным сигналами становится сонзмеримым с длительностью излучаемого импульса.

Для измерения малых расстояний применяют лазерные дальномеры, работающие в непрерывном режиме (рис. 3.10, *б*). Расстояния определяют путем сравнения фаз модулирующих колебаний, соответствующих моменту излучения и моменту прихода отраженных сигналов в приемное устройство локатора.

Для информационного обеспечения мобильных роботов разработан лазерный дальномер, используемый в обзорно-информационной системе (рис. 3.11). Для обработки информации, поступающей с дальномера, применяют мини-ЭВМ М-6000, однако возможно применение практически любой современной мини- и микроЭВМ, обладающей развитым набором средств коммутации и преобразования сигналов и обеспечивающей достаточное быстродействие.

Обзорно-информационная система позволяет измерять геометрические характеристики среды в сферической системе координат — дальность и угловое положение луча дальномера. Аппаратные возможности, заложенные в обзорно-информационной системе, обеспечивают сканирование лучом поверхности с частотой 8 Гц в секторе обзора $\pm 30°$. При этом дискретность по углу сканирования может составлять 1°, 2° и 4°. Положением сектора обзора поверхности и дискретностью осмотра можно управлять от ЭВМ.

Обзорно-информационная система построена на базе полупроводникового лазера из арсенида гелия. Лазер работает в ближней инфракрасной области света (0,9 мкм). Режим работы лазера импульсный, частота посылок импульсов около 2 МГц. В дальномере используется фазоимпульсный метод, позволяющий измерять рас-

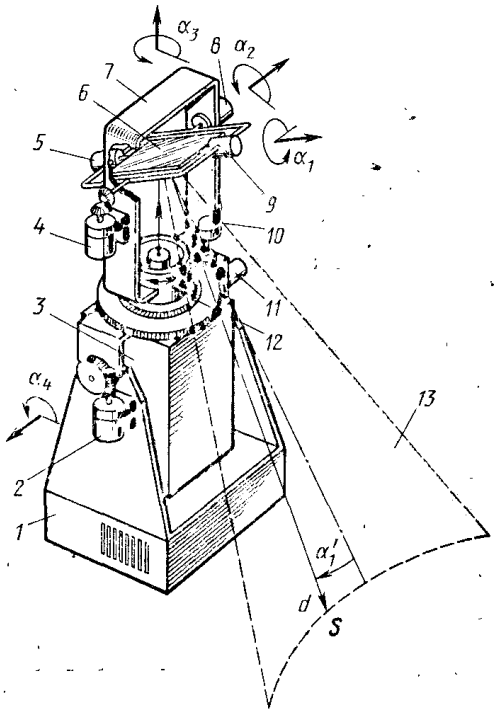


Рис. 3.11. Схема обзора и состав обзорно-информационной системы:
1 — блок управления; *2*, *4*, *10* — приводы по α_2, α_3, α_4; *3* — измеритель расстояний; *5* — устройство подкачки зеркала; *6* — отклоняющее зеркало; *7* — блок обзора; *8*, *9*, *11*, *12* — датчики углов α_1, α_2, α_3, α_4; *13* — скан

стояние в диапазоне 0,3—4 м с погрешностью ±3 см (при малых изменениях альбедо поверхности). Для устранения в системе оптического параллакса оси излучателя и приемника совмещены.

Измерения в секторе обзора технически и программно организованы таким образом, что в режиме реального времени одновременно с определением дальности проводится первичный анализ сканируемой области внешней среды с целью выделения ее характерных особенностей для реализации управления движением мобильных роботов. Чтобы обеспечить управление роботом в реальном масштабе времени, необходимо проведение сложных преобразований и расчетов дальномерно-угловых характеристик внешней среды. Ниже приведены рекомендации по организации этих преобразований в обзорно-информационной системе, которые являются достаточно универсальными.

Измеренная дальность и значения углов для наблюдаемой точки поверхности преобразуются в декартовы координаты этой точки следующим образом (кинематическая схема системы приведена на рис. 3.11). Ось OZ направлена вдоль оси вращения $\vec{\alpha}_3$ при $\alpha_4 = 0$, оси OX и OY ориентированы соответственно по сторонам системы при $\alpha_4 = 0$, центр системы координат O расположен на пересечении $\vec{\alpha}_3$ и $\vec{\alpha}_4$ осей вращения. Обозначим $\mathbf{p}$ — единичный вектор вдоль направления падающего на зеркало луча измерителя расстояний, $\mathbf{n}$ — вектор нормали к плоскости зеркала, $\mathbf{R}$ — точка отражения луча измерителя расстояний от зеркала, d — измеренная линейная дальность в направлении текущих измерений $\mathbf{S}$. Координаты измеренной точки поверхности $\mathbf{r}$ определяются по формуле

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} + d\mathbf{S},$$

где $\mathbf{S} = \mathbf{p} - 2\mathbf{n}\,(\mathbf{p},\ \mathbf{n})$; $\mathbf{R} = \mathbf{T}_4\mathbf{R}_0$; $\mathbf{T}_4$ — матрица поворота по оси вращения $\vec{\alpha}_4$; $\mathbf{R}_0 = (0,\ 0,\ R_z)$.

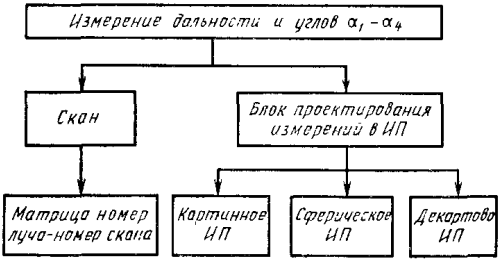


Рис. 3.12. Способы представления локационной дальнометрической информации в ЭВМ:
ИП — информационное поле

Когда вектор $\mathbf{p}$ направлен по оси вращения α_3, формулы для координат вектора $\mathbf{S}$, направления измерений (без учета угла α_4) принимают вид

$$S_x = \cos^2\alpha_1 \sin 2\alpha_2 \cos\alpha_3 - \sin 2\alpha_1 \cos\alpha_2 \sin\alpha_3;$$
$$S_y = \cos^2\alpha_1 \sin 2\alpha_2 \sin\alpha_3 + \sin 2\alpha_1 \cos\alpha_2 \cos\alpha_3;$$
$$S_z = 1 - 2\cos^2\alpha_1 \cos^2\alpha_2.$$

Осмотр участков внешней среды может быть обеспечен как за счет движения робота при фиксированных углах α_2, α_3, α_4, так и за счет изменения этих углов. Простейшей операцией при осмотре вторым способом будет наведение обзорной системы в заданную точку по центральному лучу. В этом случае

$$\mathbf{S}\,|_{\alpha_1=0} = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{R}}{\|\mathbf{r} - \mathbf{R}\|}.$$

При $\alpha_4 = 0$ для α_2, α_3 получим соотношения

$$\alpha_2 = -\frac{1}{2}\arccos S_z; \quad \alpha_3 = \operatorname{arctg}\frac{S_y}{S_x}.$$

Основные способы представления информации о результатах дальнометрического осмотра среды, полученной с помощью обзорной системы при наблюдении из неподвижной точки, иллюстрирует рис. 3.12.

Совокупность данных для измеряемых точек, получаемая при сканировании зеркала, назовем сканом. Последовательность сканов образует матрицу — дальнометрическое описание осматриваемой сцены. Эта матрица получается, например, с помощью блока обзора при развертке поверхности по углу α_2. Осмотр сцены может включать одну или несколько разверток, отличающихся друг от друга углом α_3. Если осмотр состоит из ряда разверток, то получаемую в результате проведения каждой из них информацию, представленную в виде матриц, необходимо «склеить». Это удобно делать, используя структуры типа информационного поля, например, сферическое поле $c(\varphi, \psi)$, где c — одна из характеристик осмотра в данном направлении, а сферические углы φ, ψ определяются по формулам

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\sin\alpha_2} + \alpha_3;$$

$$\psi = \operatorname{arctg}\frac{2\cos\alpha_2\sqrt{\sin^2\alpha_2 + \operatorname{tg}^2\alpha_1}}{\cos^2 2\alpha_2 - \operatorname{tg}^2\alpha_1}.$$

Удобно использовать также представление в виде картинного поля $c(x_к, y_к)$, где $x_к$, $y_к$ — координаты, определяющие направле-

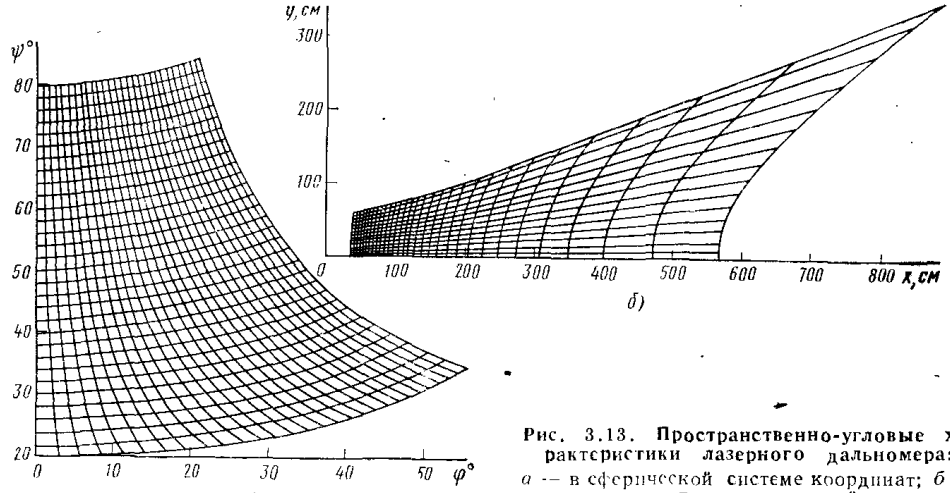


Рис. 3.13. Пространственно-угловые характеристики лазерного дальномера:
а — в сферической системе координат; *б* — в системе координат картинной плоскости

ние в картинной плоскости (вертикальной или горизонтальной). Так, для горизонтальной картинной плоскости, находящейся на расстоянии H от точки отражения от зеркала сканирующего луча, будем иметь

$$x_к = S_x \frac{H}{|S_z|}; \qquad y_к = S_y \frac{H}{|S_z|};$$

$\mathbf{S} = (S_x, S_y, S_z)$ — вектор направления измерений.

Представления матрицы номер луча — номер скана соответственно в сферическом и картинном полях приведены на рис. 3.13.

3.4. Электромагнитные локационные датчики

Электромагнитные методы основаны на взаимодействии электромагнитного поля с металлическими объектами различной формы. Сигнал преобразователя связан с параметрами объекта сложными функциональными зависимостями и является функцией таких характеристик системы преобразователь—объект контроля, как расстояние между преобразователем и объектом, электрическая проводимость, магнитная проницаемость, нарушение сплошности материала объекта, скорость взаимного перемещения объекта и преобразователя, форма объекта. В зависимости от частотного диапазона используемых полей выделяют магнитный, вихретоковый и радиоволновый методы. При магнитном методе применяется постоянное или низкочастотное (до 200—300 Гц) магнитное поле. Диапазон частот вихретокового метода $2 \cdot 10^2$—$5 \cdot 10^7$ Гц. В радиоволновом применяют электромагнитные волны сантиметрового или миллиметрового диапазона (как правило, 3 и 8 мм).

Принцип действия магнитных датчиков основан на измерении напряженности магнитного поля вблизи металлических объектов,

создаваемого внешними индукторами или остаточным полем объекта. Для измерения используют следующие преобразователи: индукционные катушки, магнитомодуляционные преобразователи (феррозонды), датчики Холла, магнитодиоды и магнитотриоды.

Магнитное поле вблизи объекта зависит от расстояния до него и магнитных свойств материала, которые, в свою очередь, существенно зависят от структуры металла и внутренних механических напряжений объекта. Это обусловливает возможность применения электромагнитных методов для измерения расстояний до ферромагнитных металлических объектов, их линейных и угловых перемещений относительно измерителя поля; измерения толщины, обнаружения ферромагнитных тел, контроля сплошности и структуры ферромагнитных материалов. При этом используют следующие методы обработки информации: амплитудный, спектральный, анализа шумов на основе эффекта Баркгаузена.

Возможности метода сводятся к следующему.

1. Измерение расстояний до металлических объектов. Диапазон измерения 10^{-3}—10^{2} мм, погрешность 3—5 % измеряемой величины.

2. Измерение линейных перемещений. Диапазон измерений 10^{-3}—10^{2} мм, скорость перемещений 0,005—10 м/с, погрешность измерений 3—5 %.

3. Измерение толщин. Диапазон измерений 0,1—5 мм, погрешность измерений 10—20 %.

4. Контроль сплошности металла. Размеры выявляемых дефектов: длина 5 мм, ширина 0,01—0,2 мм, глубина свыше 0,1 мм, глубина залегания до 7 мм, расстояние между преобразователем и объектом до 3 мм.

5. Контроль толщины покрытий на ферромагнитной основе. Материал покрытий — проводящие неферромагнитные металлы и диэлектрические пленки, диапазон измерений 10^{-3}—10 мм, погрешность измерения 10—20 %.

6. Контроль структуры металла и механических напряжений. Удается различать структуру металла в зависимости от его фазового состава и дальности. Измеряют также напряжения в углеродистых сталях в пределах 10^{8}—$2 \cdot 10^{9}$ Па. Погрешность измерений 15—20 % верхнего предела.

Принцип действия вихретоковых датчиков основан на анализе взаимодействия с металлическим объектом переменного электромагнитного поля. Сигнал преобразователя одновременно связан со многими параметрами системы преобразователь—объект контроля, что обусловливает широкую область применения вихретоковых методов.

Используются следующие способы обработки выходных сигналов: амплитудный, амплитудно-фазовый, фазовый, измерение высших гармоник, переменно-частотный и др. Информация об измеряемом параметре может быть выдана как в аналоговой, так и цифровой форме.

Электромагнитные преобразователи используют для измерения следующих величин: расстояний до металлического объекта, угло-

вых перемещений металлического объекта или его узлов, толщины покрытий или объекта, вибраций (смещений, скорости, ускорений) металлических объектов, механических напряжений в металлическом объекте, а также для обнаружения металлических объектов, нарушений сплошности их материала и структуры материала.

В зависимости от формы объекта и решаемых задач используют вихретоковые преобразователи накладного или проходного и экранного типов. Преобразователи накладного типа представляют собой катушки различной формы (круглой, квадратной или в виде системы вытянутых проводников), располагаемые вблизи металлического объекта и питаемые переменным током. Проходные преобразователи выполняются в виде катушки, охватывающей объект. Их используют в основном для контроля объектов цилиндрической формы.

Зона действия преобразователя (расстояние от объекта) зависит от решаемой задачи. Если необходимо провести анализ объекта с большой чувствительностью и высокой локальностью (обнаружение мелких дефектов, измерение толщины стенки, толщины покрытий и т. д.), то эта зона составляет не более нескольких сантиметров. При увеличении зоны до десятков сантиметров возрастают размеры преобразователя, и локальность контроля снижается.

Ниже приведены технические характеристики вихретоковых преобразователей, используемых при решении указанных выше практических задач.

Определение расстояний до металлических объектов и контроль неэлектропроводящих покрытий на электропроводящем основании осуществляются с помощью одинаковых по схемному и конструктивному решению накладных преобразователей, обеспечивающих локальность измерений.

Преобразователи позволяют измерять расстояние до объектов с плоскими и криволинейными поверхностями. Минимальный радиус кривизны составляет 8—10 мм. Погрешность измерения расстояния зависит от шероховатости поверхности, стабильности электромагнитных параметров, ориентации преобразователя относительно объекта, а также ряда других факторов и составляет 3—10 %.

Рассматриваемые преобразователи обеспечивают также измерение толщины электропроводящих покрытий на ферромагнитной основе. Погрешность измерения составляет 10—20 %, диапазон измеряемых толщин данного покрытия 10^{-3}—1 мм.

Отсутствие контактов и быстродействие вихретоковых преобразователей позволяют использовать их для измерения зазоров, а также амплитуды и частоты вибраций. За счет применения преобразователей специальных конструкций и схем линеаризаций можно получить линейные зависимости выходных сигналов от зазоров. Малые размеры и простота конструкции позволяют их использовать для измерения зазоров и контроля вибраций в сложных промышленных агрегатах, что дает возможность создавать сравнительно простые системы определения технического состояния промышленных объектов.

Преобразователи обеспечивают измерение амплитуы вибраций $1—20 \cdot 10^3$ мкм, частоты вибраций $20—20 \cdot 10^{-3}$ Гц с погрешностью 10 и 2 % соответственно.

Вихретоковые преобразователи, как правило, могут работать при повышенных температурах и наличии агрессивных сред.

Задача получения нормированного и линейного сигнала при измерении перемещений в диапазоне $\pm(1,5—80)$ мм решается с помощью преобразователей специальной формы.

Для преобразователей, применяемых для решения перечисленных задач, общими являются следующие данные: потребляемая мощность 10—100 мВт; масса преобразователей до 0,975 кг; диапазон рабочих температур от —50 до +150 °С.

Электромагнитные преобразователи применяют для обнаружения несплошности материала изделий. Конструкции и размеры преобразователей зависят от формы изделия, способа его сканирования и требуемой чувствительности. Чувствительность современных вихретоковых преобразователей с минимальным диаметром 1 мм характеризуется следующими размерами минимального дефекта: глубина 0,1—0,2 мм, длина 1 мм, ширина у выхода на поверхность 0,01 мм. Зазор между преобразователем и поверхностью изделия при этом должен быть не более 1,0—1,5 мм. При увеличении зазора и других размеров преобразователя соответственно падает его чувствительность.

Вихретоковые преобразователи применяют для обнаружения поверхностных дефектов, но с их помощью могут быть выявлены и дефекты, находящиеся в зоне проникновения вихревых токов.

Вихретоковые преобразователи широко используют для обнаружения металлических объектов в полевых и стационарных условиях. В зависимости от расстояний до объекта и его размеров применяют преобразователи различной формы с размерами от квадратных сантиметров до квадратных метров. При этом удается надежно обнаруживать металлические предметы с размерами в 1 % размеров преобразователя на расстоянии, примерно равном половине линейного размера преобразователя. Для работы с вихретоковыми преобразователями используются гармонические и импульсные поля.

Применяя различные системы ориентации и сканирования, можно создавать устройства для распознавания формы объекта, а учитывая возможность измерения электрофизических параметров материала, можно также обеспечить селективное определение металлических объектов в зависимости от их материала: отличать бронзовые изделия от алюминиевых, стальных и т. п. Наиболее перспективно применение электромагнитных преобразователей для определения деталей или однотипных узлов из стали той или иной марки, особенно в условиях массового производства и на сборочных операциях.

Эффективное применение электромагнитные преобразователи нашли в роботизированном сварочном производстве, так как они имеют хорошее быстродействие, высокую чувствительность и точность измерений и надежно работают при воздействии мешающих факторов — повышенной температуре, интенсивном световом излуче-

ний, загрязненности воздуха и поверхности свариваемых деталей, при наличии флюса и брызг расплавленного металла. В сварочных роботах и автоматах электромагнитные преобразователи используют для измерения отклонений сварочной головки от свариваемого шва. В основном применяются преобразователи двух типов — для работы с угловыми соединениями и для работы со стыковыми соединениями. Для работы с угловыми соединениями используют, как правило, двухканальные преобразователи, с помощью которых измеряют расстояния от сварочной головки до стенок каждой из свариваемых деталей.

В ГДР разработаны двухканальные электромагнитные преобразователи с диапазоном измерения расстояния 2—8 мм и номинальным зазором 6 мм — для стальных деталей, 4 мм — для алюминиевых и 3 мм — для медных деталей.

В СССР созданы преобразователи, имеющие следующие технические характеристики: частота тока питания 1 МГц; диапазон измерения расстояний ±3 мм; номинальный зазор 5 мм; погрешность измерения ±5 %; быстродействие — не более 0,1 мс; чувствительность 1 В/мм.

Для работы со стыковыми соединениями предназначены электромагнитные преобразователи, измеряющие отклонение разделки свариваемого шва от траектории движения горелки в плоскости свариваемых деталей, в которых исключено влияние изменений превышения кромок свариваемых деталей. Эти преобразователи имеют следующие технические характеристики: частота питающего тока 50—200 кГц; предел измерений ±5 мм; погрешность измерений ±5 %; быстродействие — не более 1 мс; чувствительность 0,5 В/мм.

Электромагнитные преобразователи могут быть использованы в системе управления сварочного робота в двух режимах: обучения, когда система управления с помощью преобразователей определяет и запоминает для последующей сварки траекторию разделки свариваемого шва, и в режиме активного контроля положения сварочной горелки относительно разделки в процессе сварки.

Принцип действия радиоволновых датчиков основан на взаимодействии электромагнитного поля в диапазоне длин волн 1—100 мм с объектом и преобразовании его параметров в электрический сигнал. Измеряемыми параметрами являются интенсивность радиоволнового излучения, амплитуда, фаза, частота, поляризация колебаний, время прохождения радиоволнового импульса, пространственно-геометрические параметры радиолуча, спектр излучения. Указанные параметры радиоизлучения в результате его взаимодействия с объектом претерпевают изменения, являющиеся источником информации о наличии объекта и его свойствах. С помощью радиоволновых локационных датчиков можно измерять геометрические параметры объекта, расстояние до объекта, а также его пространственно-динамические характеристики.

Указанные параметры объектов определяют через измеряемые параметры радиоволнового излучения, поэтому в качестве методов преобразования используются амплитудные, фазовые, амплитудно-

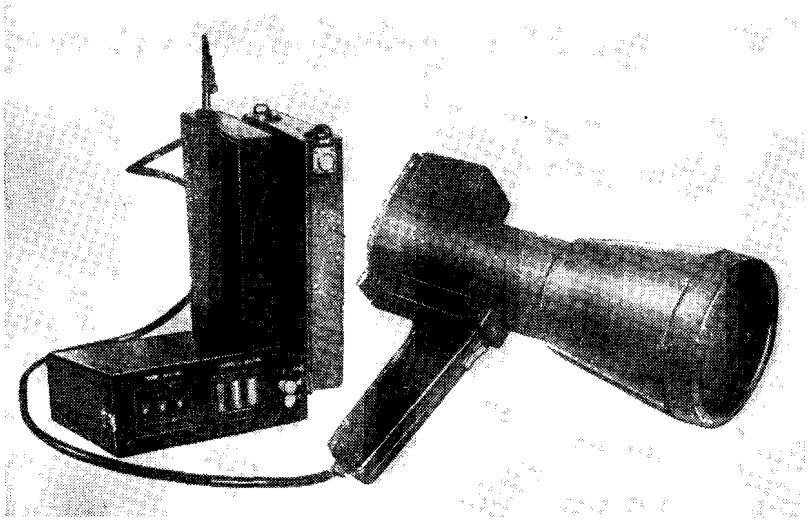


Рис. 3.14. Радиоволновый локационный датчик

фазовые, частотно-фазовые, поляризационные, геометрические, временные и спектральные методы.

Разработаны радиоволновые датчики для измерения скорости движения мобильных роботов и скорости движения деталей на конвейере, а также датчики для обнаружения объекта в рабочей зоне робота. Например, локационный датчик, работающий на частоте 13,418 ГГц, имеющий выходную мощность 5 мВт и диаграмму направленности порядка 50°, используется в качестве сенсорного устройства мобильного робота-охранника. Датчик позволяет измерять скорость робота в диапазоне 0,3—30 м/с, а также определять наличие посторонних объектов на расстояниях до 10 м в зависимости от их размеров.

Ряд радиоволновых датчиков, созданных в США и Англии, работают в диапазоне частот 5—35 ГГц, имеют выходную мощность 30 мВт, позволяют измерять скорость движения мобильных роботов с погрешностью порядка 2—3 % и используются в качестве измерителей скорости и датчиков безопасности адаптивного робота.

Внешний вид созданного в СССР радиоволнового локационного датчика для измерения скорости движения мобильного адаптивного промышленного робота приведен на рис. 3.14. Датчик работает в трехсантиметровом диапазоне волн, выходная мощность 50 мВт, диапазон скоростей 0,1—30 м/с, погрешность измерения $\pm 0{,}01$ м/с. Датчик измеряет скорость в диапазоне расстояний до 300 м. Благодаря встроенному спектру-анализатору датчик осуществляет автоматическое измерение наибольшей скорости объектов, попадающих в рабочую зону датчика. Применением процессора, выполненного на элементах жесткой логики и осуществляющего специальную обработку поступаемой информации, обеспечивается высокая помехоустойчивость и достоверность измерений.

3.5. Радиационные локационные датчики

Для измерения ряда физических величин успешно применяют ионизирующие излучения, используя общие закономерности, связывающие изменения характеристик радиационного поля, создаваемого источником излучения. Эти характеристики (например, интенсивность потока частиц) измеряют детектором излучения. В качестве детекторов используют комбинации сцинтиллирующий кристалл — фотоэлектронный умножитель, полупроводниковые структуры, ионизационные камеры. Как правило, детектор необходимо экранировать или коллимировать. Однако, поскольку экран или коллиматор изготовляют из тяжелых материалов, то размеры и масса устройства увеличены.

Локационные радиационные датчики для измерения расстояний делят на две группы: 1) устройства, основанные на измерении интенсивности пучка прямого излучения; 2) устройства, основанные на измерении интенсивности рассеянного излучения.

В устройствах первой группы источник излучения связан с объектом, расстояние до которого измеряется, а детектор находится в месте измерения. При постоянстве характеристик среды между источником излучения и детектором показания детектора зависят только от расстояния. При малых измеряемых расстояниях точность измерения невелика вследствие влияния неучитываемых геометрических факторов.

Характеристики метода: измеряемые расстояния 10—100 м; погрешность 2—3 %; время измерения малых расстояний составляет 0,1 с, а больших — зависит от активности источника. Значения линейных перемещений и скоростей вычисляют по результатам измерений расстояний.

Недостатки метода: большие размеры и масса аппаратуры вследствие необходимости вводить биологическую и антифоновую защиту; необходимость установки источника излучения на объект, скорость которого измеряется; нелинейность показаний детектора, требующая математической обработки результатов измерений.

С помощью устройств второй группы измеряют характеристики рассеянного излучения. В этом случае детектор и источник излучения расположены, как правило, рядом с одной стороны объекта.

Характеристики метода следующие: измеряемые расстояния 0,1—10 м, погрешность измерения 2—3 %; для расстояний 2,5—3 м погрешность составляет 0,5—1 %. Значения скоростей и перемещений вычисляют по результатам измерений расстояний.

Недостатки метода: сильная нелинейность измерительной характеристики, влияние формы объекта на результаты измерения, невоспроизводимость результатов для объектов, размеры которых меньше размеров сечения пучка излучения.

Осуществлять измерения можно, используя импульсные источники излучения. В этом случае измеряют временные интервалы между двумя импульсами. Известны два метода импульсных измерений расстояний. При первом методе измеряют время прохождения

импульса от источника до отражающей поверхности и затем к детектору, который находится рядом с источником, при втором — используют принцип «запрос — ответ». На одном объекте устанавливают детектор и импульсный источник излучения, посылающий импульс «запрос». На втором объекте импульс «запрос» регистрируется детектором, который включает импульсный источник, генерирующий ответный импульс. Расстояние определяется по времени прохождения туда и обратно. Быстродействие зависит от скорости и работы затворов. На малых расстояниях повышение точности достигается при использовании импульсных источников рентгеновского излучения.

Характеристики метода: измеряемые расстояния 0—100 м; погрешность измерения в диапазоне 0—15 м составляет 1 % и в диапазоне 15—100 м — 1,5 %.

Для измерения расстояний и скоростей используют γ-резонансный метод. Эффект Мессбауэра может быть применен и для измерения малых скоростей ($<0{,}3$ м/с) с очень высокой точностью. Сущность метода заключается в следующем. Если перед источником γ-квантов расположить тонкий поглотитель с энергетическими уровнями возбуждения, аналогичными уровням вещества источника, то в поглотителе будет наблюдаться резонансное поглощение γ-квантов. Если относительная скорость поглотителя и источника не равна нулю, то вследствие доплеровского смещения частоты резонанс не будет наблюдаться, и поглощение резко уменьшится. Обрабатывая показания детектора, можно получить значения скорости и расстояния между источником и поглотителем.

Характеристики метода: измеряемые расстояния 0—30 м; измеряемые скорости 10^{-5}—0,3 м/с; погрешность измерений 1 %; чувствительность 10^{-4} м/с.

При известном химическом составе газа можно использовать обратнорассеянное излучение для измерения плотности газовой среды. Погрешность измерений в этом случае составляет около 10 %. Источник и детектор располагают в одном месте, и требуется усиленная антифоновая защита, что значительно увеличивает массу и размеры устройства.

Плотность твердой фазы обычно определяют методом измерения рассеянного излучения с помощью прибора, состоящего из источника γ-излучения и детектора, разделенных экраном, поглощающим прямое излучение. Метод применяют для измерения тонких поверхностных слоев толщиной от 5 до 15 см. На единичное измерение требуется 0,5—5 мин. Погрешность измерения плотности 1—30 % при проведении предварительной градуировки.

Во всех описанных выше случаях в качестве детекторов служат сцинтилляционные детекторы, полупроводниковые детекторы или газоразрядные счетчики. Широкая номенклатура таких устройств вместе с сопутствующим оборудованием выпускается отечественной промышленностью.

3.6. Пневматические локационные датчики

Пневматические (струйные) системы очувствления используются для анализа как внешней, так и внутренней информации промышленных роботов. В современной робототехнике на основе методов пневмоавтоматики и с помощью датчиков очувствления измеряются такие физические параметры, как линейное и угловое перемещения, расстояние (линейные размеры и наличие деталей), скорость, ускорение, усилие, температура, давление.

При разработке рассматриваемых датчиков находят применение следующие типы пневматических преобразователей: сопло-заслонка пневмомеханического типа, струйный дискретный (кодовый с системой сопл и кодовым диском на восемь двоичных разрезов), струйный частотный, пневмоакустический.

Имеется несколько отечественных и ряд зарубежных разработок пневматических систем очувствления промышленных роботов, в которых развит опыт применения этих систем в захватах роботов, в кинематических парах, в движущихся приводных устройствах, а также в технологическом оборудовании робототехнологических комплексов (например, в матрицах пресс-форм для штамповки при обслуживании прессов промышленными роботами).

Разработаны типовые схемы контроля с использованием гидрогазодинамических принципов, обеспечивающие измерение указанных параметров робототехнических систем.

В системах очувствления промышленных роботов находят применение такие гидрогазодинамические эффекты, как прерывание струи, турбулизация ламинарной струи, прикрытие вытекающей турбулентной струи, преодоление заданного усилия или давления, изменение частоты струйного генератора колебаний в зависимости от измеряемой температуры, обработка импульсов в частотной системе прерываний струи. Измерения проводятся по дифференциальной компенсационной схеме.

С помощью пневматических систем очувствления промышленных роботов можно определить следующие параметры:

линейное перемещение в ближней рабочей зоне (ближняя локация) в диапазоне 0—4 мм; минимальная погрешность 0,5 %; максимальная погрешность 3 %; быстродействие 1 мс; максимальная чувствительность 200 Па/мкм;

признак наличия детали — диапазон расстояний 0—20 мм (пневмоакустический метод обеспечивает расширение диапазона до 1 м); максимальная погрешность 8 %; минимальная погрешность 2 %; быстродействие 2 мс; максимальная чувствительность 200 Па/мкм;

усилие в диапазоне 0,1—10 Н; 1—100 Н; погрешность 5 %; быстродействие 0,2 с;

температуру в интервале 10—800 °С; погрешность 5—10 %, чувствительность 10 °С; быстродействие 20—30 с;

давление в диапазоне 0—10 МПа; погрешность 2—5 %; быстродействие 0,2—1 с; чувствительность 0,1 МПа. Преимуществами пневматических датчиков являются малые размеры и масса, повы-

Таблица 3.1

Страна	Функциональное назначение	Тип преобразователя	Быстродействие, с	Габаритные размеры, мм
Япония	Датчик в захвате, пальцевый захват с равномерным давлением	Струйный эластичный надувной	0,1—0,5	3×4
Япония	Очувствленный пневмозахват	Вакуумный сильфонный датчик силы	0,02	—
Швеция	Пневмозахват	Пневмомеханический	0,1	Размер захвата 30×80
ФРГ	Датчик наличия объекта	Струйный переключатель; пневмомеханический	0,1—0,05	5×8
СССР	Датчик наличия объекта	Струйный турбулентный	0,1—0,4	—
США	Датчик наличия объекта	Вакуумный струйный	0,09—0,1	—
США	Адаптивный захват	Вакуумный пневмомеханический самоориентирующийся	0,1—0,05	Матрица 4×5, оперирует с объектами, имеющими в плане размер до 70 мм

шенная надежность, простота конструкции и технологии изготовления, работа без искажений в средах с повышенным уровнем электромагнитных и иных помех (например, сварка и др.), возможность нормально функционировать во взрывоопасных, непрозрачных и с повышенной радиацией зонах, а также в условиях повышенных вибраций, при ударных нагрузках и в других экстремальных условиях. Пневматические системы безотказно работают и в обычных условиях машинообрабатывающих цехов заводов.

К недостаткам пневматических систем очувствления следует отнести ограниченные диапазон дальности действия и функциональные возможности (например, невозможность обеспечения технического зрения, распознавания формы, цвета объемных деталей и т. п.), недостаточное в ряде случаев быстродействие, большие размеры источников питания по сравнению с источниками питания других систем очувствления. Быстродействие пневматических систем ограничивается скоростью звука в данной среде (для воздуха — 330 м/с).

Данные, характеризующие практическое применение пневматических систем очувствления в промышленных роботах, разработанных в СССР и в зарубежных странах, представлены в табл. 3.1.

Пневматические (струйные) локационные датчики применяют, например, для защиты инструмента и оборудования от поломок, в комплексах для выполнения операций холодной штамповки. Представляет интерес захват промышленного робота со струйными

датчиками очувствления, в котором одновременно осуществляется измерение диаметра заготовки. Струйные элементы выполняют функции регистрации объекта в захвате по двум координатам, его ориентации в захвате, а также формирования управляющих воздействий на зажим захвата.

Исходя из функциональных возможностей, преимуществ и недостатков пневматических систем очувствления можно определить следующие рациональные области их применения:

в промышленных роботах с пневматическим приводом для целей определения наличия объектов, измерения расстояний, малых перемещений;

в роботах, используемых в экстремальных условиях (взрывоопасные среды, повышенные температуры, радиация, электромагнитные помехи и т. п.), для целей получения максимальной информации по совокупности основных параметров;

в «очувствленных» захватах роботов, независимо от типа приводных механизмов.

Глава 4

СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

4.1. Основные принципы и способы построения систем технического зрения

Среди систем адаптации роботов наибольшей информативной емкостью обладают системы технического зрения, сообщающие роботу информацию о свойствах объекта и среды манипулирования посредством преобразования, анализа и обработки видеоинформации с помощью ЭВМ.

Видеодатчики СТЗ. Приемниками и первичными преобразователями видеоинформации в СТЗ служат как телевизионные камеры промышленного телевидения на основе вакуумных трубок типа видикон, так и различные твердотельные преобразователи, например, ПЗС-камеры (на основе приборов с зарядовой связью), а также ПЗС-линейки, фотоматричные преобразователи, диссекторы и т. п.

Телевизионные системы на базе вакуумных приборов работают в полном телевизионном формате и имеют до 10^6 бит информации в одном кадре. Такие системы имеют низкое быстродействие, что обусловлено последовательным способом передачи видеосигнала, и при использовании их в робототехнических устройствах обычно необходимы меры по снижению информативной емкости обрабатываемой видеоинформации.

Системы на базе фотодиодных матриц обладают большим быстродействием за счет параллельного способа считывания информации с элементов матрицы (время считывания одной строки около 0,2 мкс). Однако разрешение таких систем ограничено числом элементов дискретизации порядка 4096.

Системы на основе ПЗС-камер характеризуются меньшими габаритными размерами по сравнению с другими видами СТЗ, большим быстродействием по сравнению с телевизионными камерами на видиконах, большим количеством элементов дискретизации по сравнению с фотоматричными СТЗ, однако обладают и недостатком — ограниченным динамическим диапазоном преобразования свет — сигнал.

Видеодатчик в СТЗ может быть закреплен на захвате робота, а может находиться в фиксированном положении. В измерительных роботах, как правило, видеодатчик расположен на захвате.

Основные функции СТЗ. С помощью СТЗ осуществляется обнаружение, распознавание или идентификация объектов, определение их местоположения и координат. По выполняемым функциям СТЗ бывают трех типов: распознающие, обзорно-информационные и

измерительные. Однако, как правило, в одном СТЗ сочетается несколько функций.

Распознающие и измерительные СТЗ находят применение на операциях контроля качества, классификации и сортировки как неподвижных, так и движущихся объектов. Они позволяют адаптивному роботу взять деталь с движущейся ленты конвейера, погрузить в тару или поместить ее на новое место для последующей технологической операции, или произвести сборку узла, окраску и т. п.

Измерительные системы, кроме определения геометрических параметров объекта (что выполняют и распознающие СТЗ), вычисляют расстояния до объектов, преобразуют координаты, определяют ориентацию и т. п.

Обзорно-информационные СТЗ служат для организации технологического процесса посредством анализа сцены, например, для обнаружения преград или необходимых предметов, свободных проходов для транспортных роботов, организации визуальной обратной связи, например, для слежения за швом при дуговой сварке, и т. п.

Операции по формированию, анализу и идентификации изображений осуществляются различными машинными процедурами. Изображение формируется в памяти ЭВМ в виде матриц отсчетов градаций яркости в рассматриваемом участке сцены (объекта). На этапе формирования изображение часто подвергается предварительной обработке (сглаживанию, повышению контрастности, фильтрации и т. п.) для улучшения качества.

На этапе анализа изображений составляются описания двумерных или трехмерных сцен (объектов). Для этого применяются разнообразные процедуры сегментации изображений, из которых наиболее информативными и часто применяемыми являются алгоритмы выделения контуров (например, на основе пространственного дифференцирования, сравнения градиентов с порогом, свертки и т. п.) и алгоритмы расширения областей.

Идентификация изображений состоит в объединении результатов анализа описаний или признаков с геометрическими данными объектов. Обычно символьное описание содержит сведения о типе, положении и ориентации объекта в поле зрения датчика, которые используются для сопоставления идентифицируемой сцены с ее символьными моделями (эталонами), хранящимися в памяти ЭВМ. Одной из центральных задач идентификации изображений является распознавание объекта по совокупности характерных признаков.

Признаки идентификации. Определяющим фактором для выполнения функций СТЗ в реальное время являются признаки, по которым проводится идентификация объектов. Существуют множество способов распознавания объектов, применение которых связано с необходимостью выполнения большого объема машинных процедур и, следовательно, наличием в ЭВМ большого объема оперативной и других видов памяти. В СТЗ для роботов находят применение упрощенные методы распознавания по геометрическим признакам объектов, по их характерным конструктивным элементам (число

отверстий, расстояние между ними и другие особенности). Признаки идентификации определяются в режиме обучения робота и хранятся в памяти ЭВМ как эталонные, с которыми сравниваются те же параметры, определяемые в процессе работы системы.

Перспективными в СТЗ для промышленных роботов являются различные самообучающиеся алгоритмы, которые определяют признаки идентификации на этапе обучения робота в процессе нескольких предъявлений объекта СТЗ. Иногда эталонами служат не отдельные признаки, а шаблоны изображения. Идентификация в этом случае осуществляется наложением изображения на шаблон. Положение объекта определяется по координатам его бинарного силуэта. Ориентация может быть рассчитана по критериям, выбираемым пользователем, например, по направлению, соответствующему наибольшему радиусу, или по направлению на наибольшее отверстие.

Для СТЗ характерна тесная взаимозависимость аппаратной части системы и программного обеспечения. Выбор того или иного способа идентификации объектов может быть определяющим для схемного решения всей системы, и, наоборот, необходимость использования некоторого вида датчиков может однозначно задать алгоритмы преобразования исходной информации.

В некоторых случаях в качестве признаков для распознавания объектов в СТЗ используются не свойства и характеристики объектов, а специально нанесенные на них различные метки. Метками могут служить стилизованные надписи, штриховые линии или геометрические фигуры. Измеряемыми параметрами являются геометрические признаки, цветовой контраст, либо то и другое. Каждый символ стилизованной надписи представляется двоичным числом с разрядностью, соответствующей количеству сегментов тарифной сетки.

Штриховой код представляет собой систему параллельных прямых линий различной толщины и с различными расстояниями между ними. При сканировании и преобразовании в двоичную форму код несет информацию об условных знаках и цифрах.

Применение стилизованных надписей и кодов требует нанесения стартовых, центровочных и финишных меток для синхронизации процесса считывания и обработки информации об объектах, движущихся перед датчиком.

Для считывания штрихового кода могут быть использованы методы телевизионного (при большом допуске смещения положения штрихового кода), лазерного сканирования, а также прожекторный метод с применением цветных штриховых кодов.

При определении цвета штрихов кода прожекторным методом используется датчик цвета, основными элементами которого являются три цветовых фильтра (красный, синий, зеленый) и расположенные за ними три фотодиода. Объект, цвет которого подлежит определению, освещается прожектором, а отраженный световой луч падает на чувствительную поверхность датчика. Три выходных сигнала преобразуются в цифровую информацию и обрабатываются

на микропроцессоре. Напряжение, поступающее с каждого диода, зависит от цвета фильтра и цвета объекта. Датчик различает два близких друг к другу цвета путем сравнения цвета объекта с цветами, заложенными в память.

Основные требования, предъявляемые к СТЗ. Выполнение функций в реальном масштабе времени, т. е. со скоростью течения технологического процесса без задержек и простоев, и, как следствие, сокращение обрабатываемой информации — главные, хотя и противоречивые требования к СТЗ. Сокращение обрабатываемой информации может быть осуществлено различными способами, а именно: ее сжатием на входе аппаратными средствами, выбором простых признаков идентификации, разработкой быстродействующих алгоритмов с распараллеливанием вычислений и операций, применением многопроцессорных сетей, построением специализированных для обработки изображений многопроцессорных вычислителей.

Быстродействие СТЗ в зависимости от ее назначения и выбора способа аппаратно-программной реализации обработки видеоинформации может находиться в пределах от 10^{-3} до 10 с. Так, в СТЗ с параллельным видеопроцессором оно равно нескольким миллисекундам, а в СТЗ, решающей одну из сложных технологических задач — разбор деталей из бункера, оно составляет 10 с. Для большинства технологических операций требуемое быстродействие находится в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен миллисекунд, т. е. менее 1 с. Сокращение объема обрабатываемой информации может быть достигнуто следующими способами: заменой значения яркости в некоторой точке изображения функцией яркости в пределах окна из n элементов, центр которого совпадает с этой точкой; уменьшением до двух числа уровней квантования видеосигнала в системах, осуществляющих выделение объектов в поле зрения и определение их геометрических характеристик; использованием режима слежения за выделенным объектом; применением режима целенаправленного управления процессом ввода изображения в зависимости от текущих результатов обработки и анализа; переходом от кодирования сигналов от всех элементов изображения к кодированию длин отрезков или длин серий построчной развертки изображений и т. п.

Основные параметры СТЗ. Помимо быстродействия, СТЗ характеризуются числом элементов дискретизации видеосигнала, числом градаций яркости видеосигнала, контрастом между фоном и объектом, освещенностью рабочей сцены, формой, размерами и количеством расположенных на рабочей сцене объектов манипулирования, наличием возможностей оперативного изменения алгоритмов идентификации в зависимости от изменения состава и свойств объектов, а также от изменения технологического процесса.

Число элементов дискретизации в основном зависит от вида и характеристик применяемого видеодатчика.

Важным параметром, характеризующим СТЗ, является число градаций яркости видеосигнала. В СТЗ видеосигнал квантуется в зависимости от принятых границ его значений как функции ярко-

сти. Если приняты два уровня значений сигнала (черный, белый), преобразованные в дискретные значения цифрового сигнала «единицы» и «нуля», то полученное изображение называют бинарным или двоичным. В большинстве СТЗ для упрощения и сокращения времени и объема обработки информации приняты два уровня градации яркости. Однако, очевидно, что чем выше требования к точности идентификации изображения, тем больше число градаций яркости видеосигнала.

Для большинства робототехнических задач целесообразно применять алгоритмы, приспособленные для работы с бинарными изображениями, что значительно сокращает обрабатываемую информацию. Если в бинарных системах каждая точка изображения описывается черным или белым цветом, то в многоградационных системах точки изображения могут иметь полутона. В бинарных системах объекты наблюдаются либо в отраженных, либо в проходящих лучах; при этом изменение направления освещения позволяет получать тени, по которым можно судить о высоте объекта. Хотя процедуры обработки видеоинформации в бинарных системах проще и соответственно выше скорость обработки, многоградационные системы позволяют получить значительно больше информации об объекте. Для решения многих технологических задач необходимы зрительные системы, оперирующие с трехмерной информацией.

Большое значение имеет контраст между объектом и фоном, а следовательно, и освещение объектов. СТЗ, работающие в диапазоне световых волн, получили наибольшее распространение. Осветительные устройства предназначены для создания наилучших для СТЗ условий освещенности рабочей зоны робота. Примерами оптимальных условий освещенности могут служить организация «бестеневой» сцены в рабочей зоне, подсветка зоны в заданном диапазоне спектра для контрастного выделения предметов в ней и т. п. В тех случаях, когда это возможно, используется подсветка с обратной стороны детали, дающая высокую контрастность изображения. Применяется также освещение спереди рассеянным белым светом, например, при контроле качества детали. При прослеживании сварного шва используется лазерное освещение.

Известно несколько методов получения трехмерной информации: методы структурированного освещения, триангуляции и др. Системы, оперирующие с объемной информацией, в гораздо меньшей степени подвержены влиянию изменений внешнего освещения, уменьшения контраста и т. п., они также обеспечивают однозначное определение трех декартовых координат. Одна из областей применения рассматриваемых систем — роботизированная сварка. В этом случае отпадает необходимость точной фиксации зрения. Другое применение — извлечение беспорядочно наваленных друг на друга деталей из бункера.

Чаще всего СТЗ оперируют с объектами, расположенными на рабочей сцене раздельно. Изменение размеров идентифицируемых объектов в больших пределах связано с переналадкой СТЗ (оптической системы).

Возможность изменения оператором алгоритмов обработки в связи с заменой объектов или изменением технологического процесса может быть реализована различными аппаратными средствами, например, применением микропрограммной памяти в составе СТЗ, хранящей алгоритмы обработки в виде отдельных законченных процедур программных модулей, последовательность которых может быть задана с пульта управления СТЗ.

Большие удобства предоставляет оператору и световое перо для управления последовательностью команд, программных модулей и т. д.

Режимы работы СТЗ. Их, как правило, три — настройка, обучение, рабочий.

В процессе настройки осуществляется установка камеры, наведение объектива на объект, фокусировка, выбор порога бинаризации (в соответствии с принятым числом уровней градации) и пространственная калибровка. Вначале, управляя рядом параметров видеодатчика путем изменения фокусировки, пространственного положения камеры, раскрытия диафрагмы, чувствительности, смены объективов и др., формируют изображение сцены с заданными характеристиками. Управление параметрами датчика осуществляется по результатам обработки визуальной информации и состоит из следующих операций: поиск объектов в поле зрения, фокусировка и настройка по яркости и контрасту.

Процесс поиска объектов в большинстве СТЗ основан на условии размещения светлых объектов на темном фоне. Поле зрения разделяется на несколько последовательно просматриваемых зон, и определяется освещенность каждой зоны. Зона с наибольшей освещенностью считается местом нахождения объектов. Камера наводится на эту зону уже для детального обследования.

Фокусировка осуществляется перемещением объектива по оптической оси до достижения максимума резкости, оцениваемой по числу пересечений продифференцированным видеосигналом некоторого заранее заданного уровня. По положению объектива определяется расстояние до искомой детали объекта.

Подстройкой чувствительности камеры обеспечивается адаптация изображения по яркости.

Среди факторов, влияющих на точность зрительной системы, можно назвать следующие: дискретизация изображения, геометрические искажения камеры, выбор порога бинаризации, калибровка, погрешности алгоритмов обработки. Для уменьшения геометрических искажений камеры оптическая ось должна быть перпендикулярна рабочей плоскости. Линзы объектива не должны давать искажений, а изображение должно быть тщательно сфокусировано.

Работа СТЗ связана с необходимостью согласования систем координат камеры, робота и рабочей среды. Эта процедура выполняется во время калибровки системы. Вначале производится калибровка СТЗ и определяются масштабы и направления координатных осей поля зрения. После чего координатная система камеры «привязывается» к системе робота. Преобразование координат описы-

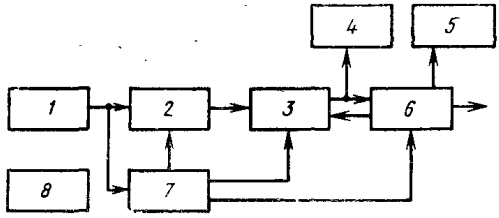


Рис. 4.1. Обобщенная структурная схема СТЗ:

1 — оптическая система и преобразователь свет—сигнал; *2* — блок АЦП и предварительной обработки видеосигнала; *3* — блок БЗУ и связи с ЭВМ; *4* — видеоконтрольное устройство; *5* — дисплей; *6* — ЭВМ; *7* — блок синхронизации; *8* — осветительное устройство

вается в терминах переноса начала координат и центра вращения системы. В связи с тем, что СТЗ должна быть прокалибрована в тех же единицах, что и система робота, при калибровке используются позиционные датчики робота.

Необходимо отметить, что калибровка осуществляется с помощью специально разработанных программ на языке высокого уровня. Вначале определяются координаты объекта или элементов изображения. Затем осуществляется масштабирование и переход в координатную систему робота.

Пример процедуры калибровки. В поле зрения помещается диск с отверстием в центре, и захват робота с закрепленным на нем указателем приводится в точку, соответствующую центру диска. По специальной команде с датчиков считываются значения углов и запоминаются рассчитанные координаты. Затем процедура повторяется для другой точки поля зрения. По полученным координатам рассчитывают необходимые параметры преобразования.

После калибровки СТЗ определяются соотношения, связывающие координаты поля зрения с координатами робота. Это выполняется аналогично описанной процедуре с тем отличием, что данные соотношения (преобразования) ищутся в трехмерном пространстве.

Состав и устройство СТЗ. На рис. 4.1 приведена обобщенная структурная схема СТЗ. Блоки, входящие в схему, как правило, присутствуют во всех СТЗ.

В блоке *2* предварительная обработка видеоинформации может отсутствовать. Блок *3* может и не содержать буферную память, если ЭВМ обеспечивает обмен информацией в реальном масштабе времени или имеет память достаточного объема. Однако запоминающее устройство блока *3* может быть предназначено для хранения микропрограмм, позволяющих оперативно перестраивать алгоритмы и систему в ответ на изменения в рабочей зоне (сцене) робота.

Блок *6* может представлять собой как серийную ЭВМ (микроЭВМ), так и специализированную ЭВМ для обработки изображений (например, параллельную видеопроцессорную вычислительную машину). МикроЭВМ выполняет следующие функции: организует процесс совместной работы блоков СТЗ по заданным алгоритмам; обрабатывает массивы цифровых данных о состоянии рабочей зоны с целью идентификации объектов; вычисляет координаты объекта; определяет ориентацию объектов; выдает результаты обработки в систему управления робота по командам последней; обеспечивает контроль состояния всех остальных устройств СТЗ. Блоки *4* и *5*

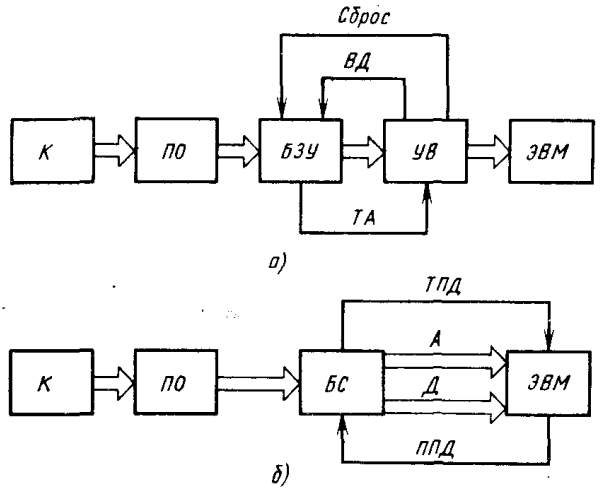


Рис. 4.2. Структурные схемы СТЗ:

а — с программным вводом; *б* — с прямым доступом в память ЭВМ

служат для контроля как за изображениями, так и за ходом выполнения программы обработки информации.

Способ сопряжения видеодатчиков с микропроцессором (ЭВМ). В основном для этого используют два режима ввода: программный и прямого доступа в память ЭВМ. В СТЗ с программным вводом (рис. 4.2, *а*) информация от камеры *К*, содержащей фотоприемник, объектив и схему управления записью и выводом видеосигналов, поступает в устройство предварительной обработки ПО. Здесь в простейшем случае проводится квантование видеосигнала по уровню и аналого-цифровое преобразование. В более сложных случаях на этапе предварительной обработки выделяются контуры и линии изображений, а также заданные основные признаки, которые затем используются при идентификации или определении параметров положения и ориентации. Этим достигается сжатие видеоинформации. Полученное цифровое изображение или его фрагменты записываются в оперативное запоминающее устройство *БЗУ*, выполняющее функции буфера, необходимое для согласования скорости и порядка ввода цифрового изображения в процессор.

Ввод осуществляется устройством ввода *УВ* — стандартным устройством используемого процессора или ЭВМ. При необходимости ввода следующего кадра ЭВМ командно через устройство ввода переводит *БЗУ* в режим вывода информации (сигнал «Сброс»). Как только *БЗУ* переходит в состояние готовности к выводу, через устройство ввода в ЭВМ передается сигнал «требование адреса» *ТА*. При этом ЭВМ выполняет необходимое число пересылок из *БЗУ* в собственную память, причем каждая пересылка сопровождается сигналом по шине «ввод данных» *ВД*. После этого начинается обработка введенного кадра. Разновидностью такого режима является ввод с прерыванием выполняемой программы, которое инициируется внешним устройством.

Режим прямого доступа в память ЭВМ иллюстрируется схемой на рис. 4.2, *б*. Собственно процессор в вводе не участвует, а все функции по вводу данных в ЭВМ выполняет внешнее устройство. Эти функции заключаются в формировании цифрового изображения и адресов памяти ЭВМ, регенерации памяти. В начале цикла ввода блок сопряжения *БС* вырабатывает сигнал «требование прямого доступа» *ТПД*. Процессор заканчивает очередное обращение к па-

мяти и вырабатывает сигнал «предоставление прямого доступа» *ППД*. По этому сигналу внешнее устройство, т. е. блок сопряжения, начинает формировать данные и адреса памяти ЭВМ и осуществляет регенерацию памяти ЭВМ до окончания ввода кадра или его заданной части. После этого блоком сопряжения снимается состояние прерывания.

Сравнение режимов ввода визуальной информации в ЭВМ показывает, что для программного ввода характерны использование стандартных устройств и значительные затраты времени на программное управление процессом ввода, в то время как при прямом доступе в память быстродействие значительно выше и ограничено тактовой частотой ЭВМ, хотя аппаратная часть устройства сопряжения сложнее. Однако существует и другой подход как к построению структурной схемы СТЗ, так и к выбору методов для выполнения их функций, отличный от рассмотренных выше. Отличие заключается в отсутствии микропроцессорного управления с целью достижения большого быстродействия и высокой степени оперативности. Всю электронную аппаратуру СТЗ размещают на наборе схемных плат, позволяющих различным роботам выполнять только им свойственные специфические функции по идентификации изделий, обнаружению дефектов и ориентации, осуществлять электронное вращение изображения до его соответствия изображению, хранящемуся в памяти. Для выполнения некоторых функций иногда достаточно даже одной модульной платы, позволяющей построить довольно сложные системы. Функции, выполняемые отдельными платами, — это запоминание, синхронизация, обнаружение и т. д. Выходная информация обрабатывается с помощью платы, получившей название персонализации. Эта плата преобразует выходные данные СТЗ в формат, требуемый для контроллеров наиболее распространенных роботов. Таким образом создается возможность унификации, комплексирования и оперативного изменения архитектуры СТЗ.

4.2. Видеодатчики систем технического зрения

В качестве преобразователей свет — сигнал применяются диссекторы, телевизионные передающие трубки, видиконы, приборы с зарядовой связью (ПЗС), полупроводниковые матричные фотоприемники и др.

Диссектор. Изображение в диссекторе проецируется на полупрозрачный фотокатод, за которым следует секция переноса и электронной фокусировки изображения в плоскости диафрагмы. Диафрагма имеет в центре малое отверстие и вырезает таким образом из переносимого изображения один элемент. За диафрагмой установлен фотоумножитель, с нагрузки которого снимается видеосигнал. Выбор считываемого элемента осуществляется отклонением электронного изображения относительно диафрагмы в секции переноса

Спектральная чувствительность диссекторов определяется типом фотокатода и составляет 350—1200 нм. Максимальная ин-

тегральная чувствительность многощелевого фотокатода 120 мкА/лм, неравномерность чувствительности по полю зрения достигает 30—50 %, а в центральной части — 10—20 %. Разрешающая способность имеет наибольшее значение 250—300 линий в рабочей зоне 17 × × 17 мм². Максимальная частота развертки для стандартной фокусирующе-отклоняющей системы (ФОС-121) не превышает 10—15 кГц. Диссекторы обладают линейной световой характеристикой в широком диапазоне освещенностей: 10^{-2}—10^{2} лк в токовом режиме и от 10^{-6}—10^{-1} лк в счетном режиме. Нелинейность по полю достигает 20 %.

Основной особенностью диссекторов по сравнению с видиконами и приборами с зарядовой связью является отсутствие накопления заряда на фотокатоде. Недостатки диссекторов по сравнению с преобразователями с накоплением заряда — низкая чувствительность (особенно при больших освещенностях фона и неподвижных объектах), а по сравнению с приборами с зарядовой связью и другими твердотельными датчиками — большие размеры, высокие напряжения источников питания и отсутствие зависимости между моментом появления изображения на фотокатоде и временным положением видеосигнала или моментом появления тока в отклоняющих катушках. Достоинство диссекторов заключается в том, что в них изображение движущихся предметов не смазывается.

Видикон. Наиболее распространенный тип передающей телевизионной трубки — видикон. Изображение в видиконе проецируется на плоскую мишень из полупроводникового материала, на котором накапливается потенциальный рельеф. Мишень сканируется электронным лучом, подключающим считываемый участок к нагрузке. Рельеф при этом разрушается и восстанавливается к моменту следующего прохода луча.

По способу формирования развертки видиконы могут быть разделены на две основные группы: с магнитным и с электрическим отклонением считывающего луча. В телевизионных камерах, как правило, используются видиконы с магнитным отклонением. Видиконы с электростатической системой развертки весьма перспективны для СТЗ промышленных роботов, так как позволяют увеличить скорость развертки и реализовать нестандартные ее виды, в том числе радиальную, спиральную. Кроме того, при их использовании более простыми средствами достигается высокая линейность отклонения луча, размер растра не зависит от частоты отклоняющих сигналов и отсутствует поворот изображения при изменении напряжения на фокусирующем электроде.

Основные типы видиконов и их технические характеристики приведены в табл. 4.1.

Близкими по разрешению к видиконам и другим передающим телевизионным трубкам являются матрицы на ПЗС.

Приборы с зарядовой связью. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения на ПЗС представляют собой МОП-конденсатор, образованный слоем кремния, слоем двуокиси кремния и металлической пластиной. Последовательным соединением сдвиго-

Таблица 4.1

Параметр	Тип видикона		
	ЛИ421-3М	ЛИ428-1	ЛИ437-1
Размер трубки, мм:			
длина	165	164	100
диаметр	26,7	26,7	13,6
Длина волны при максимальной чувствительности, нм	530	550	550
Область спектральной чувствительности, нм	370—800	400—750	400—750
Рабочая площадь мишени, мм²	9,5×12,7	9,5×12,7	4,9×6,6
Ток сигнала, мкА	0,1	0,1	0,15
При освещенности, лк	1	1	5
Интервал рабочей освещенности, лк (не более)	1000	5000	1000
Разрешающая способность:			
в центре	6000	500	500
в углах	600	400	400
при скорости движения объекта 3 мм/с	300	270	300
Геометрические искажения, %	2	2,5	3
Неравномерность сигнала, %	20	20	20
Темновой ток, мкА	0,15	0,1	0,05
Гарантийный срок службы, ч	—	1200	1200
Глубина модуляции, %	35	—	—
Фокусировка	Магнитная	Электростатическая	
Система отклонения луча	Магнитная	Электростатическая	Магнитная

вых регистров (цепочек) на ПЗС получают матричный формирователь сигналов. Возможна либо электрическая, либо световая инжекция неосновных носителей в ячейках ПЗС. Световая инжекция в ПЗС на основе кремния осуществляется в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного (400—1100 нм) при энергии фотонов, достаточной для перехода носителей через запрещенную зону шириной 1,12 эВ.

Отличительными особенностями матриц на ПЗС по сравнению с видиконами являются прецизионная геометрия расположения элементов, отсутствие инерционности, низкий уровень выходных шумов, высокая линейность фотоэлектрического преобразования, малые размеры и масса прибора, низкое напряжение и малая потребляемая мощность, высокая устойчивость к механическим, акустическим и электромагнитным воздействиям, более высокая надежность и долговечность. Матрицы ПЗС обеспечивают возможность работы с импульсными источниками света и запоминания аналоговой информации.

Основным недостатком ПЗС является потеря носителей заряда при переносе и в связи с этим искажение изображений — геометрический шум.

Таблица 4.2

Параметр	Тип матрицы		
	СПЗС-1М	ФПЗС-2М	А1018
Число строк	576	288	288
Число столбцов	512	256	232
Область максимальной спектральной чувствительности, Нм	—	700—800	—
Чувствительность по напряжению, мВ/лк	20	—	3
Интегральная чувствительность при оптическом вводе *, мА/лм	—	23	—
Выходной сигнал, мВ	$\leqslant 100$	120 **	—
Освещенность, лк	2	—	$5 \cdot 10^{-2}$
Экспозиция насыщения *, лк·с	—	0,08—0,16	$\leqslant 1$
Размеры фоточувствительной секции, мм	6,91×9,22	4,32×5,88	—
Число выводов	48	24	—
Напряжение питания, В	20	20	—
Габаритные размеры (без выходных концов), мм	36×47,4××3,7	19,5×16×3	—

* При источнике освещения типа А (цветовая температура 2856 К).
** При включении выходного транзистора по схеме истокового повторителя.

Таблица 4.3

Тип	Темновой ток, мкА	Напряжение пробоя, В	Интегральная чувствительность, мА/лм	Максимальная спектральная чувствительность, А/Вт	Постоянная времени, мс
ФДЛ-2А ФКБ-1А ФКБ-2А ФКБ-3А	0,01	50,0	3,0	0,4	15
ФКБ-1Б ФКБ-2Б ФКБ-3Б	0,1	25,0	2,0	0,2	100
ФМП-1А ФМП-2А	0,1	50,0	3,5	0,4	100
ФМП-1Б ФМП-2Б	1,0	5,0	3,0	0,3	1000
ФДЛ-3Б ФТЛ-1А ФТЛ-1Б	0,1 1,0 50,0	4,0 10,0 3,0	2,5 50,0 20,0	0,25 5,0 2,0	10^4 10^6 10^7

Таблица 4.4

Тип	Шаг между элементами линейки,	Размеры нечувствительной зоны между элементами,	Число элементов
	мм		
ФДЛ-1	1,19	0,56	11
ФДЛ-2	0,42	0,08	4
ФДЛ-3	0,10	0,02	32
ФТЛ-1	0,625	0,30	2
ФТ-200	0,625	0,30	200

Находят применение несколько основных типов матриц на ПЗС, имеющие хорошие эксплуатационные характеристики в условиях вибрации в диапазоне частот 1—3000 Гц с максимальным ускорением 20 м/с^2 и акустических шумов в диапазоне 50—10 000 Гц при максимальном уровне звукового давления 160 дБ. Матрицы сохраняют работоспособность после воздействия многократных ударов с максимальным ускорением 500 м/с^2, линейных (центробежных) нагрузок с ускорением 200 м/с^2.

Основные параметры матриц ПЗС приведены в табл. 4.2.

Фотоэлектрические видеодатчики. Фотоприемники на основе кремния предназначены для регистрации оптических сигналов в диапазоне длин волн 350—1100 нм. В СТЗ в качестве преобразователей свет — сигнал широко применяются кремниевые фотодиоды, защищенные слоем двуокиси кремния. Основные параметры некоторых бескорпусных кремниевых фотоприемников приведены в табл. 4.3, 4.4.

В фотоэлектрических датчиках используются одно- или многоэлементные фотоприемники, линейные или матричные.

Полупроводниковые матричные фотоприемники МФ-16 (16 × × 16 элементов) и МФ-14 (32 × 32 элемента) предназначены для преобразования оптических сигналов в диапазоне длин волн 0,5—1,0 мкм в электрические, их усиления, кратковременного хранения и построчного считывания.

Осиовные технические параметры фотоприемиых матриц

Расстояние между центром соседних фотоячеек (шаг матрицы), мм	0,15
Размеры фоточувствительной области элемента, мм	0,1×0,1
Выходное напряжение логического нуля, мВ	150—300
Выходное напряжение логической единицы, мВ	30
Время хранения, мкс	200
Чувствительность, В/Дж	$1 \cdot 10^1$
Минимальная длительность импульса считывания, мкс	2
Минимальная длительность импульса стирания, мкс	2
Потребляемый ток, мА	2

Электрическая схема фотоприемной ячейки вместе с устройствами, обеспечивающими ее функционирование, приведена на рис. 4.3. Каждая ячейка матрицы содержит фоточувствительную область (фотодиод *V1*) и три МДП-транзистора *V2* — *V4*, выполняющих функции усиления сигнала и управления ячейкой. Ячейка может работать в двух режимах. Первый — обычный фотодиодный режим работы, когда транзисторы *V2* и *V3* открываются соответствующими потенциалами на затворах. Второй, основной режим работы, — считывание с накоплением. Он характеризуется тем,

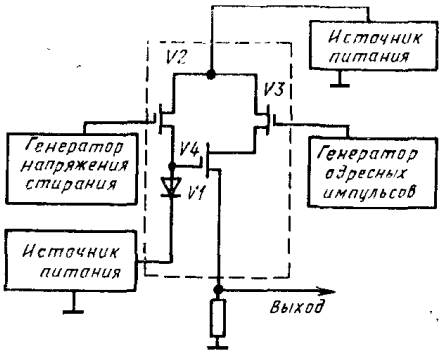


Рис. 4.3. Схема включения ячейки фотоприемной матрицы

что энергия излучения, падающего на фоточувствительную область, накапливается в течение определенного времени, а затем считывается.

В режиме накопления чувствительность матрицы существенно выше, и создается возможность управлять ее выходным сигналом изменением времени накопления.

Полный цикл преобразования оптической информации в электрическую в режиме накопления состоит из трех последовательных процессов — стирания, записи, считывания.

Обобщенные сравнительные характеристики приемников излучения основных типов представлены в табл. 4.5.

ПЗС и фотодиодные матрицы обладают малой инерционностью при считывании, а их дискретная структура позволяет получать информацию без искажений при довольно больших скоростях движения анализируемых объектов.

Размытия движущихся объектов в плоскости дискретных матриц не наблюдается, если выполняется условие

$$\frac{v_k f t_c}{L x_м} < 1,$$

где v_k — составляющая скорости смещения области, перпендикулярная оптической оси датчика; f — фокусное расстояние оптической системы; t_c — время считывания кадра; L — расстояние от датчика до анализируемого объекта; $x_м$ — шаг дискретизации элементов матрицы.

Таблица 4.5

Параметры	Телевизионные трубки	Матрицы ПЗС	Фотодиодные матрицы
Интегральная чувствительность, мА/лм	10^2	$5 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^4$
Разрешающая способность, лин/мм	50	25	5
Погрешность измерения, %	2	2	3
	20	15	5
Область спектральной чувствительности, нм	400—800	400—1100	400—1100
Отношение сигнал/шум	<100	100	400
Масса, г	50	5	5
Произвольный опрос	Невозможен	Возможен	
Диапазон освещенности, лк	1—200	0,2—20	0,1—200
Число элементов дискретизации	500×500	250×250	$\geqslant 10^4$

4.3. Телевизионные системы технического зрения

Большая часть задач идентификации при анализе изображений может быть решена на основе анализа монокулярного телевизионного изображения.

СТЗ, в которых видеодатчиками (преобразователями свет — сигнал) служат телевизионные камеры (на вакуумных трубках типа видикон или на ПЗС), нашли наибольшее распространение. А многие из тех СТЗ, в которых применены другие типы видеодатчиков, фактически являются частными случаями телевизионных систем.

Число элементов дискретизации в телевизионных датчиках наиболее часто равно 256×256 и 512×512, но известны случаи, когда используется 1000×1000 элементов. Последнее возможно при построении специальных камер с малыми искажениями. В большинстве случаев приходится считаться с геометрическими искажениями на краях мишени видикона и ограничивать телевизионный кадр.

Максимальное число элементов дискретизации телевизионного кадра для обработки изображения в цифровом виде не может быть более 700 из-за наличия сигналов синхронизации и необходимости гашения луча. Число строк, несущих информацию, не превышает 580. Разрешающая способность видиконов по полю фотокатода составляет в среднем 550 линий. Для уменьшения искажений целесообразно использовать центральную часть фотокатода.

В общем случае при равностороннем прямоугольном растре количество информации в кадре

$$I = N^2 \log_2 m,$$

где N^2 — число элементов в кадре; m — число градаций яркости.

При кодировании изображения за время кадра 40 мс на обработку одного элемента изображения отводится временной интервал

$$\Delta t = 1/(f_к N^2),$$

где $f_к$ — частота кадров.

При наличии буферного запоминающего устройства (БЗУ) для хранения массива информации об изображении за время Δt необходимо преобразовать в код видеосигнал от элемента изображения, занести результат преобразования в БЗУ и подготовить его к приему следующего результата преобразования.

Частота обмена информацией между АЦП и ЗУ

$$f_{обм} = \log_2 m/\Delta t_{зап},$$

где $\Delta t_{зап}$ — время записи в ЗУ.

Для кодирования и запоминания изображения с параметрами $N^2 = 512 \times 512$, $m = 16$ и частотой $f_к = 25 \div 30$ кадров в секунду требуются быстродействующие АЦП с частотой преобразования $f_{АЦП} = 25$ МГц и запоминающее устройство с частотой обмена $f_{обм} = 150$ Мбит/с.

В телевизионных СТЗ обычно предусматривается возможность управления процессом считывания сигналов с датчика. В зависи-

мости от конкретных условий работы в СТЗ может быть введена информация обо всем поле зрения датчика или же о каком-либо участке (фрагменте), представляющем интерес. Порядок считывания сигналов устанавливается программой.

Другим способом сокращения вводимой видеоинформации в СТЗ является применение контурных систем со следящей разверткой. Для решения этой задачи необходимо иметь средства реализации следящей развертки и обеспечить программное управление разверткой при обходе контуров.

Так, в одном из вариантов СТЗ с контурной системой анализ изображения основан на случайном выборе отдельных контурных элементов. Развертывающая точка движется по полю кадра по случайному закону, и в момент, когда она попадает на контур, начинает действовать следящая развертка. Далее точка движется вдоль контура, считывая его фрагмент некоторой заданной длины. После этого слежение принудительно прекращается, и система вновь переходит в режим поиска до начала передачи следующего фрагмента. Такая система позволяет отказаться от запоминающих устройств для хранения информации об изображении или свести их объем к минимальному, она также обеспечивает работу в реальном масштабе времени.

Средняя частота попадания развертывающей точки на некоторый элемент контура в единицу времени (средняя эквивалентная частота кадров) определяется выражением

$$f_э = \frac{2vl}{\pi N_x N_y + 2Ll},$$

где v — скорость развертки; l — длина фрагмента; N_x, N_y — размеры кадра; L — суммарная длина всех контуров.

Применение специальных твердотельных ПЗС-камер, имеющих по сравнению с видиконами большую надежность и меньшие массу, размеры и стоимость, позволяет увеличить угол и поле обзора СТЗ с одновременным получением нескольких проекций изображений от нескольких камер. В сочетании со структурированным освещением возможно получение информации о трехмерных объектах. Третье измерение объекта можно также определить путем установки ПЗС-камеры и источника света на руке манипулятора. Методы, основанные на структурированном освещении, кроме того, позволяют просто и точно измерять расстояния до объектов по искажениям световых полос (например, способом триангуляции). На этих же принципах работают некоторые СТЗ: следящие за сварным швом.

ПЗС-камеры представляют интерес также для ввода информации о движущихся объектах, так как сканирование в них осуществляется в одном направлении. Они практически воспроизводят картину без искажений и более чувствительны, чем вакуумные телевизионные трубки.

Преимуществом телевизионных камер является возможность дистанционного обзора окружающей робот среды, что позволяет на основании анализа данных дальнего обзора осуществлять пере-

мещение робота к требуемому месту или туда, где были замечены расхождения с эталоном при «грубом» обзоре. Телевизионная камера, установленная на захвате робота или вблизи места непосредственного выполнения технологических операций, дает другую, более точную информацию для действий.

Размещение нескольких телевизионных камер таким образом, чтобы они обозревали объект манипулирования с разных сторон, устраняет необходимость его поворота или вращения. Очевидно, кроме удобства и простоты выполнения функций робота это позволяет ускорить работу СТЗ.

Другим важным достоинством телевизионных СТЗ является возможность работы не только с крупными, но и с очень мелкими объектами за счет сопряжения телекамеры с микроскопом.

Примером применения таких СТЗ служат СТЗ, используемые при автоматизированной сборке транзисторов и микросхем, которые позволили автоматизировать операции отбраковки, установки, крепления кристаллов, распайки выводов. В этих системах использованы камеры промышленного телевидения, оснащенные микроскопами.

В них применены устройства позиционирования кристалла, устройства для выполнения технологических операций и вычислительные средства для обработки визуальной информации и управления группой установок. СТЗ состоит из мини-ЭВМ, пяти процессоров для обработки изображения и 50 сборочных машин. Мини-ЭВМ осуществляет групповое управление сборочными машинами. Когда кристалл для распайки попадает в зону индикации микроскопа, сборочная машина посылает в ЭВМ сигнал запроса распознавания. Распознавание осуществлено методом последовательного подбора стандартных эталонов изображений специфических участков кристаллов. Кроме того, ЭВМ управляет положением телекамер, которые передают изображение эталонов в соответствующий процессор, работающий в режиме реального времени. Во время обратного хода луча управляющая ЭВМ осуществляет оценку координат положения кристалла и выдачу заключений о вводе других эталонов.

Система эта очень эффективна, так как позволяет реализовать задачи управления 50 установками с помощью одной мини-ЭВМ, пяти процессоров и несложной СТЗ. С применением этой системы вдвое ускорился процесс сборки транзисторов, увеличилась надежность сборки.

Робот с подвижной телевизионной камерой имеет большие возможности. В нем эффективно используется разрешающая способность камеры, что позволяет с большой точностью осуществлять преобразование координат, т. е. параметры перемещения руки, на которой закреплена камера, легче поддаются измерению. Движение камеры — один из источников получения динамической информации, которая в дополнение к данным статического анализа открывает новые возможности для повышения эффективности СТЗ. В частности, удается упростить статический анализ и сократить объем априорной информации, требуемой для работы системы.

Наиболее удобный способ — использование камеры, перемещаемой в произвольное положение. В этом случае идентификация объектов или фрагментов, изображение которых получено с разных точек наблюдения, не вызывает затруднений. Так как число точек наблюдения не ограничено, то точность работы зрительной системы значительно повышается. И, наконец, как было сказано выше, возможно получение информации об объемной конфигурации объекта.

4.4. Системы технического зрения для экстремальных условий

Практическое применение робототехнических устройств в экстремальных условиях требует принципиально нового подхода к решению задачи визуализации и контроля состояния внешней среды робота. Часто для обеспечения нормальной работы СТЗ необходима информация о состоянии оптически непрозрачной среды, например, толщи металла, бетона, дерева, непрозрачной жидкости (эмульсии), дыма, масляного тумана и т. п.

В связи с развитием робототехники для условий производства и работы в агрессивных оптически непрозрачных средах широкое применение в роботах найдут радиационные, тепловые, радиоволновые и акустические СТЗ (рис. 4.4), которые вместе с оптическими системами составляют общую номенклатуру СТЗ.

При сборке узлов в процессе сопряжения деталей часто возникают ситуации, связанные с необходимостью выявления бракованных деталей или их неправильного взаимного расположения. При этом узел, как правило, не позволяет проводить контроль в оптическом диапазоне. В подобных случаях в адаптивных роботах могут быть использованы средства радиационной интроскопии.

Радиационные СТЗ. Системы плоскостной радиационной интроскопии основаны на просвечивании контролируемого объекта проникающей ионизирующей радиацией, преобразовании радиационного изображения объекта в светотеневое или электронное изображение и передаче этих изображений на расстояние с помощью оптических или телевизионных каналов.

В зависимости от энергии и интенсивности применяемого излучения могут быть получены изображения внутреннего строения разнообразных изделий. В ряде случаев имеется возможность выявлять микрообъекты с размерами начиная от 20 мкм. Известны рентгенотелевизионные системы, в которых для преобразования радиационного изображения в светотеневое используют рентгеновские электронно-оптические преобразователи, флюороскопические системы с флюороскопическими экранами и рентгенографические системы с рентгеновской пленкой. Рентгеновские изображения могут обрабатываться с помощью автоматизированных систем обработки изображения.

В перспективе в СТЗ широкое применение получит вычислительная томография, сущность которой заключается в послойном попереч-

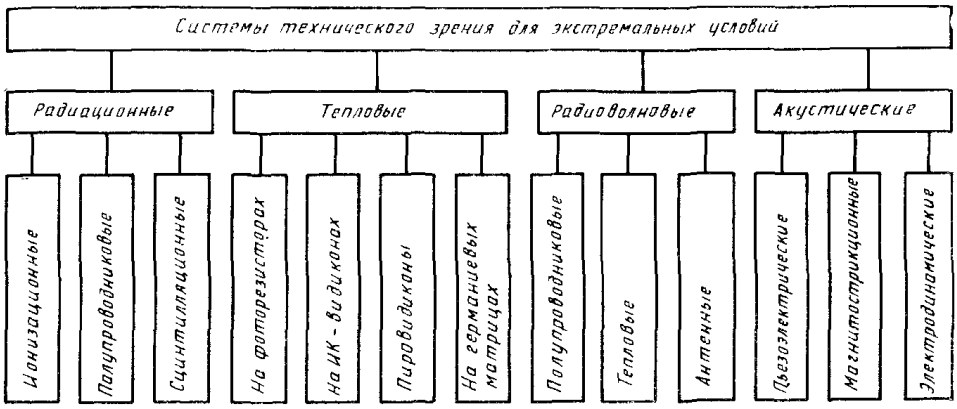


Рис. 4.4. Классификация СТЗ

ном сканировании объекта коллимированным рентгеновским пучком, измерении излучения за объектом детекторами с линейной характеристикой, синтезе матрицы значений плотности вещества в элементарных ячейках слоя и построении полутонового изображения слоя интересующего объекта или среды по вычисленным значениям плотности.

Радиационный вычислительный томограф содержит излучатель, питающее устройство, систему детекторов (причем излучатель и детекторы объединены в едином сканирующем устройстве), устройство для размещения и перемещения объекта исследования, блок электронных усилителей и аналого-цифровых преобразователей, мини-ЭВМ с необходимым набором внешних устройств (полутоновый телевизионный дисплей, запоминающее устройство, накопитель на гибких дисках, алфавитно-цифровую и функциональную клавиатуры).

Принцип томографии может лечь в основу построения адаптивных роботов специальных видов, в которых объект контроля должен быть определен в пространственной системе координат. Координаты каждого элемента восстановленного изображения вычисляются с помощью мини-ЭВМ и могут быть использованы для управления роботом.

Радиационные СТЗ могут найти применение в тех случаях, когда ограничения, вызываемые опасностью проникающего излучения, массогабаритными характеристиками аппаратуры и относительно невысоким ее быстродействием, не являются определяющими.

В настоящее время получают также развитие другие физические принципы томографической диагностики среды и объектов такие, как ядерно-магниторезонансная, электрическая, акустическая и тепловизионная и др.

Тепловые СТЗ. Физической основой тепловых СТЗ является эмиссия электромагнитного излучения нагретыми телами. Закономерности теплового излучения описываются законами Стефана — Больцмана и Планка, которые характеризуют соответственно пол-

ную энергетическую светимость теплового излучения, его спектральное распределение и положение максимума кривой этого распределения.

Для практического использования наибольший интерес представляет инфракрасный диапазон длин волн 2—14 мкм, соответствующий максимуму излучения реальных тел при температурах от +20 до +300 °С.

Принцип действия тепловизоров (приборов для визуализации тепловых полей нагретых тел) заключается в преобразовании с помощью сканирующих или матричных фотоэлектронных преобразователей рельефа интенсивности излучения на поверхности объекта (адекватного его температурному полю и распределению коэффициента излучения) в эквивалентное распределение электрических сигналов, визуализация которых на экране видеомонитора представляет в аналоговой яркостной форме тепловое поле объектов.

Тепловые СТЗ позволяют бесконтактно регистрировать распределение температур по объекту при известной его излучательной способности, либо распределение коэффициента излучения, если объект термостатирован и температура по его поверхности равномерна. Тепловая СТЗ представляет собой систему пассивного типа. Она включает оптическую систему для фокусировки ИК-лучей, фотопреобразователь, системы развертки (сканирования) и оконечные устройства обработки информации.

Наиболее распространенными фотопреобразователями в тепловидении являются полупроводниковые фоторезисторы на основе сурьмянистого индия или сплавов кадмий — ртуть — теллур. Они требуют охлаждения жидким азотом.

В рассматриваемых СТЗ, как и в традиционных телевизионных системах, эффективно применение волоконной оптики для передачи изображения (здесь — теплового) из зоны контроля к системе развертки.

Для простейших случаев (задача селекции объектов, нагретых выше нормы, контроль температуры заготовки для штамповочного робота) эффективно применение пирометров с одноэлементным фотоприемником.

Характеристики некоторых типов тепловых СТЗ приведены в табл. 4.6. Для их использования в роботах необходимо дополнительно предусматривать автоматизированные системы обработки изображений.

Радиоволновые СТЗ. Работа этих систем основана на взаимодействии электромагнитного поля в диапазоне длин волн 1—100 мм с объектом и преобразовании этого поля в двумерное изображение.

Они позволяют определить геометрические параметры объекта (форму, размеры, в том числе толщину), расстояние до объекта и его пространственно-динамические характеристики (скорость движения, смещение, поворот, амплитуду и частоту вибраций), электрофизические характеристики (влажность, температуру, относительную степень напряженно-деформированного состояния) и др.

Таблица 4.6

Страна	Система преобразования ИК-излучения	Тип фотоприемника	Число кадров в 1 с
Швеция (AGA)	Рефракционная оптическая сканирующая система	Фоторезистор охлаждаемый	16
СССР	Зеркальная сканирующая система		25
Голландия (Филипс)	ИК-телевизионная система	Пировидикон	50
Франция (Ориель)	Матричный фотоприемник	ИК-матрица	

Страна	Диапазон регистрируемых температур, °С	Температурная чувствительность, °С	Угол зрения	Число элементов дискретизации
Швеция (AGA)	От —30 до +800	0,1	60	100×100
СССР	20—400	0,2	40	100×100
Голландия (Филипс)	20—300		60	400×400
Франция (Ориель)	20—400	0,1	40	128×128

Для получения изображения контролируемого изделия или исследуемой среды с помощью радиоволн применяют механическое сканирование объекта одиночным зондом или линейкой, составленной из набора одиночных приемных и излучающих элементарных антенн, а также матричные антенны или фотоуправляемые полупроводниковые пластины. Разрешающая способность радиоволновых СТЗ ограничена значением $\sim 0{,}5\lambda$. Изображение радиоволнового поля также должно подвергаться автоматизированной обработке с помощью микро- или мини-ЭВМ.

Акустические СТЗ. Акустический метод основан на способности упругих волн высокой (более 20 кГц) частоты распространяться в жидких, газообразных и твердых средах, отражаться от неоднородностей сред, а также на их способности поддаваться визуализации. На ультразвуковых частотах излучателям и приемникам упругих волн легко придать хорошую направленность, что облегчает использование этих волн для СТЗ.

Для обеспечения работы акустических СТЗ необходимо сканирование объекта либо одиночным датчиком, либо линейкой датчиков или использование матричных наборов пьезопреобразователей. Изображение формируется путем обработки эхосигналов на ЭВМ.

Разрешающая способность акустических СТЗ определяется длиной волны λ, так как раздельно регистрируются лишь объекты, размеры которых не менее λ. Для повышения разрешающей способности и минимальных значений измеряемых расстояний, перемеще-

ний и скоростей объекта целесообразно увеличивать рабочую частоту. Однако с увеличением частоты растет затухание ультразвуковых волн и соответственно уменьшается дальность действия.

Наиболее высокие частоты (порядка 10—20 МГц) могут быть использованы при работе в однородной жидкой среде (воде) в пределах небольших расстояний (0,3—0,5 м). При работе в жидкостях с большим затуханием ультразвука (нефть, мутная вода и т. п.) рабочие частоты необходимо уменьшать. Так как затухание ультразвуковых волн в воздухе много больше, чем в воде, то при работе в воздушной среде необходимо использовать более низкие частоты (до 20 кГц).

Акустические изображения, получаемые аппаратными средствами, уступают по качеству изображениям, полученным оптическими СТЗ, поэтому особое значение приобретают алгоритмы фильтрации и улучшения качества изображений, представленные в п. 4.5.

4.5. Алгоритм обработки изображений

Процесс идентификации объектов, находящихся в рабочей зоне робота, обычно включает два этапа: выделение характерных признаков объектов; собственно распознавание объектов по найденной совокупности характерных признаков. В соответствии с такой структурой процесса идентификации алгоритмы обработки информации в СТЗ принято делить на алгоритмы предварительной обработки и алгоритмы распознавания, что носит в известной степени условный характер, так как в некоторых практических приложениях одни и те же по математической сути алгоритмы могут быть использованы на обоих этапах рассматриваемого процесса.

В соответствии со спектральным диапазоном преобразователей свет — сигнал и принципом действия СТЗ датчик формирует изображение рабочей зоны робота. Под изображением обычно понимается двумерная картина поля интенсивности излучений рабочей зоны. Формально получение изображения заключается в определении функциональной зависимости интенсивности излучений рабочей зоны от координат точек изображения x и y:

$$J = f(x, y). \tag{4.1}$$

В дальнейшем под «изображением» будем понимать именно функциональную зависимость $f(x, y)$. С учетом принятой терминологии задачей предварительной обработки является поиск каких-либо особенностей функции $f(x, y)$, которые могли бы указать на тип объекта, находящегося в рабочего зоне.

Дискретизация изображения. Первый шаг предварительной обработки изображения на ЭВМ состоит в квантовании исходного изображения $f(x, y)$. Квантование ведется как в пространстве по координатам x и y, так и по значению функции изображения $f(x, y)$.

Для упрощения описания алгоритмов предварительной обработки в дальнейшем будем рассматривать прямоугольные изображения

в декартовой системе координат XOY при условии, что дискретные представления таких изображений, полученные в результате равномерного квантования координат x и y, т. е. при квантовании значения функции $f(x, y)$, берутся в равноотстоящих друг от друга точках изображения. Результатом квантования в пространстве, или, как иногда говорят, по полю изображения, является дискретное изображение — функция $g(m, n)$, значения которой совпадают со значениями $f(x, y)$ в точках:

$$x = x_0 + \Delta x m; \; y = y_0 + \Delta y n,$$

где $m = 0, 1, 2, \ldots, M - 1$; $n = 0, 1, 2, \ldots, N - 1$.

На каждом этапе формирования изображений вносятся аппаратурные помехи (шумы), искажающие функцию $f(x, y)$ по пространственным признакам.

Методы фильтрации шумов. Для компенсации шумов в изображении успешно применяется простой *пороговый метод*, при котором последовательно проверяется цифровое представление яркости всех элементов изображения $f(x, y)$, и если яркость элемента F_{ij} анализируемой группы из $N \times N$ элементов превышает среднюю яркость группы

$$G = \frac{\sum\limits_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \sum\limits_{l=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} f_{i+k} f_{j+k}}{N^2} \qquad (4.2)$$

на заданное пороговое значение η, то его яркость заменяется на среднюю яркость группы G. Здесь N обычно принимается равным 3, 5 или 7.

Поскольку шум пространственно не коррелирован, его спектр содержит более высокие пространственные частоты, чем спектр изображения. В связи с этим широкое распространение получили методы сглаживания шумов, основанные на низкочастотной пространственной фильтрации, например, методы анизотропной и рекуррентной фильтрации.

Анизотропная фильтрация основана на свертке исходного массива изображения F размером $M \times M$ со сглаживающим массивом размером $N \times N$. При $N \ll M$ реализуется программное сканирование изображения F массивом N и операция свертки на каждом шаге. В результате формируется новый массив B сглаженного изображения, имеющий размер $M \times M$. Такой алгоритм удобен для реализации на ЭВМ. Для каждого элемента a_{ij} исходного массива F выполняется преобразование, которое заключается в перемножении обрамляющей его матрицы заданного размера $N \times N$ с элементами W_{kl} сглаживающей матрицы. Последующее суммирование произведений дает элементы выходного массива

$$b_{ij} = \sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \sum_{l=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} F_{i+k;\, j+l} W_{kl}. \qquad (4.3)$$

В качестве элементов массивов фигурируют числовые значения, соответствующие яркости.

Отдельно следует остановиться на построении сглаживающего массива W.

Качество фильтрации повышается с увеличением N, однако пропорционально N^2 растет время обработки исходного изображения на ЭВМ. Массив W должен быть нормирован для получения единичного коэффициента передачи, чтобы при фильтрации не изменялась средняя яркость изображения. Могут применяться сглаживающие массивы W следующего вида:

$$\frac{1}{9}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix};\quad \frac{1}{10}\begin{bmatrix}1&1&1\\1&2&1\\1&1&1\end{bmatrix};\quad \frac{1}{16}\begin{bmatrix}1&2&1\\2&4&2\\1&2&1\end{bmatrix}.$$

Рекуррентняя фильтрация более эффективна, чем анизотропная, и дает экономию объема памяти ЭВМ. При рекуррентной фильтрации используются не только элементы исходного, но и элементы уже сглаженного изображения. Общая формула для рекуррентной фильтрации такая же, как и для анизотропной:

$$b_{ij} = \sum_{k=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \sum_{l=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} F^*_{i+k;\ j+l} W_{kl}, \qquad (4.4)$$

где элементы $F^*_{i+k;\ j+l}$ могут быть взяты как из исходного массива F, так и из выходного массива B.

Если анализируемый элемент находится в центре программного окна, то при сканировании слева направо и сверху вниз в программное окно вводятся элементы из массива B, если $k = -N/2, \ldots, 1$ и $l = -N/2, \ldots, +N/2$, или из массива F — для всех других позиций окна.

Экономия необходимого объема памяти ЭВМ достигается при записи элементов отфильтрованного изображения B в ячейки, где хранились соответствующие элементы массива F, поскольку при рекуррентной фильтрации они больше не используются. Сглаживающий массив W выбирается из тех же соображений, что и при анизотропной фильтрации.

В практике построения СТЗ встречаются случаи, когда основной вклад в общую погрешность изображения вносит один элемент системы; тогда не применяют фильтрацию шумов всего изображения, а предусматривают только компенсацию погрешностей этого элемента. Примером может служить геометрический шум, свойственный твердотельным полупроводниковым приемникам — приборам с зарядовой связью и фотодиодным матрицам. Чтобы скомпенсировать погрешность любого элемента фотоприемника, целесообразно использовать двойное считывание каждого кадра — темновое и с изображением. Скорректированное изображение получается вычитанием сигналов каждого элемента, полученных при двух считываниях.

Интегральные и дифференциальные алгоритмы предварительной обработки дискретных изображений. К *интегральным* относят алгоритмы, основанные на определении некоторых суммарных свойств

дискретных изображений, их глобальных особенностей. Большинство из них базируется на интегральных преобразованиях. Приведенные ниже интегральные и дифференциальные алгоритмы даны в виде, удобном для программирования. Эти алгоритмы используют для предварительной обработки как многоградационных, так и бинарных изображений, причем в последнем случае они значительно упрощаются.

Гистограммой яркости изображения называется зависимость числа случаев равенства значений яркости в дискретном изображении какой-либо фиксированной величине от этой величины:

$$P(h) = \sum K;\ \{k \in K : g(m, n) = h\}, \tag{4.5}$$

где $h = 0, 1, 2, \ldots, H - 1$.

Наряду с функцией $P(h)$ иногда определяют **средние значения**

$$\bar{g} = \sum_{h=0}^{H-1} hP(h),$$

и среднее квадратическое отклонение $\sigma_y^2 = \sum_{h=0}^{H-1} (h - \bar{g})^2 P(h)$.

Дискретное преобразование Фурье — один из самых распространенных методов предварительной обработки, он широко используется для фильтрации различных помех. Указанное преобразование определяется следующим выражением:

$$G(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n) \exp\{-j2\pi [(um/M) + (vn/N)]\}, \tag{4.6}$$

где $m = 0, 1, 2, \ldots, M - 1$; $n = 0, 1, 2, \ldots, N - 1$.

Результаты преобразования (4.6) в общем случае являются комплексными числами $G(u, v) = \mathrm{R}(u, v) + j\mathrm{I}(u, v)$. Вследствие этого часто пользуются спектрами дискретного изображения

$$\left.\begin{aligned} |G(u, v)| &= [\mathrm{R}^2(u, v) + \mathrm{I}^2(u, v)]^{1/2}; \\ \arg G(u, v) &= \operatorname{arctg}[\mathrm{I}(u, v)/\mathrm{R}(u, v)], \end{aligned}\right\} \tag{4.7}$$

а также энергетическими спектрами дискретного изображения

$$\mathbf{\Pi}(u, v) = \mathrm{R}^2(u, v) + \mathrm{I}^2(u, v). \tag{4.8}$$

В случае, когда $M = N$, преобразование Фурье имеет вид

$$G(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} G_1(m, v) \exp[-j2\pi um/N], \tag{4.9}$$

где

$$G_1(m, v) = N \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n) \exp[-j2\pi vn/N] \right\}. \tag{4.10}$$

Применение выражений (4.9) и (4.10) позволяет свести вычисление двумерного преобразования Фурье (4.6) к последовательному определению одномерных преобразований.

Основной недостаток дискретного преобразования Фурье — сравнительно большой объем вычислений. По этой причине довольно часто используются другие интегральные преобразования, проигрывающие преобразованию Фурье в наглядности и точности результатов, но отличающиеся большей простотой.

Преобразование Уолша дискретного изображения (при $M = N$) проводится по следующим зависимостям:

$$Q(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n) \prod_{i=0}^{k-1} (-1)^a, \qquad (4.11)$$

где $a = b_i(m)\, b_{k-1-i}(u) + b_i(n)\, b_{k-1-i}(v)$.

Значения коэффициентов $b_j(l)$ определяют по следующему правилу. Коэффициент $b_j(l)$ равен значению j-го разряда числа l, записанного в двоичной системе счисления. Если, например, $l = 5$, то в двоичной системе $l = 101$ и $b_1(5) = 1$, $b_2(5) = 0$, $b_3(5) = 1$.

Преобразование Адамара выполняют по следующей формуле:

$$H(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n)(-1)^a, \qquad (4.12)$$

где $a = \sum_{i=0}^{N-1} [b_i(m)\, b_i(u) + b_i(n)\, b_i(v)]$.

Величины коэффициентов $b_j(i)$ находятся в соответствии с правилом их определения в преобразовании Уолша.

Дифференциальные алгоритмы основаны на следующей предпосылке. Считается, что такие характеристики, как границы плоских объектов и отверстий в них, ребра трехмерных объектов и т. п., соответствуют максимумам нормы градиента функции изображения $f(x, y)$. Поиск градиента связан с определением производных функции $f(x, y)$, поэтому данные алгоритмы называют дифференциальными. Приведенные далее способы приближенных вычислений нормы градиента дискретного изображения $g(m, n)$ отличаются друг от друга количеством значений дискретного изображения, используемых на каждом шаге вычислений. Границы плоских объектов, ребер трехмерных объектов и т. п. могут быть определены любыми известными методами поиска максимума функции.

Простейшая схема вычислений нормы градиента сводится к следующему.

Для расчетов на одном шаге вычислений используются только три значения дискретного изображения $g(m, n)$:

$$G(m, n) = \{[g(m, n) - g(m+1, n)]^2 + [g(m, n) - g(m, n+1)]^2\}^{1/2}, \qquad (4.13)$$

где $G(m, n)$ — норма градиента функции $g(m, n)$.

Значения нормы градиента, близкие к результатам, определяемым по формуле (4.12), получаются также при использовании следующей зависимости:

$$G(m, n) = |g(m, n) - g(m+1, n)| + |g(m, n) - g(m, n+1)|.$$

Оператор Робертса позволяет производить вычисления с погрешностью меньшей, чем погрешность вычислений по (4.13). Повышение точности, однако, достигается за счет использования на каждом шаге вычислений большего числа значений дискретного изображения:

$$G(m, n) = \{[g(m, n) - g(m+1, n+1)]^2 + [g(m+1, n) - g(m, n+1)]^2\}^{1/2}.$$

При использовании абсолютных величин рассматриваемая схема дает большую погрешность, но существенно упрощается:

$$G(m, n) = |g(m, n) - g(m+1, n+1)| + |g(m+1, n) - g(m, n+1)|.$$

Вычислительная схема Собела строится в соответствии со следующими оценками нормы градиента:

$$G(m, n) = [G_x^2(m, n) + G_y^2(m, n)]^{1/2} \qquad (4.14)$$

или

$$G(m, n) = |G_x(m, n)| + |G_y(m, n)|, \qquad (4.15)$$

где

$G_x(m, n) = [g(m-1, n+1) + 2g(m, n+1) + g(m+1, n+1)] - [g(m-1, n-1) + 2g(m, n-1) + g(m+1, n-1)]$;

$G_y(m, n) = [g(m+1, n-1) + 2g(m+1, n) + g(m+1, n+1)] - [g(m-1, n-1) + 2g(m-1, n) + g(m-1, n+1)]$.

Следует отметить, что использование выражений (4.14) и (4.15) позволяет не только определять значения нормы градиента, но также по величинам $G_x(m, n)$ и $G_y(m, n)$ оценивать вектор градиента на плоскости.

Многошаговый способ вычисления нормы градиента применяют в СТЗ, когда требуется сравнительно высокая точность определения границ объектов и их элементов. Он описывается следующими выражениями:

$$G(m, n) = \sum_{i=1}^{4} G_i,$$

где G_i — скалярное произведение векторов b_i и g;

$$b_1 = [1, \sqrt{2}, 1, 0, 0, -1, -\sqrt{2}, -1];$$

$$b_2 = [1, 0, 1, \sqrt{2}, -\sqrt{2}, 1, 0, 1];$$

$$b_3 = [0, -1, \sqrt{2}, 1, -1, -\sqrt{2}, 1, 0];$$

$$b_4 = [\sqrt{2}, -1, 0, -1, 1, 0, 1, \sqrt{2}],$$

$g = [g(m-1, n-1), g(m, n-1), g(m+1, n-1), g(m-1, n),$
$g = (m+1, n), g(m-1, n+1), g(m, n+1), g(m+1, n+1).$

Выделение границ объектов в бинарных изображениях тоже относится к дифференциальным способам. Бинарными или двоичными изображениями называют дискретные изображения $g_1(m, n)$, элементы которых могут принимать только два фиксированных значения. Границы объектов в этом случае можно определить по одной из следующих логических схем:

$$m, n \in a_{гр} : [g_1(m, n) = a] \& [g_1(m, n-1) = b \vee g_1(m-1, n) =$$
$$= b \vee g_1(m+1, n) = b \vee g_1(m, n+1)];$$

$$m, n \in a_{гр} : [g_1(m, n) = a] \& [g_1(m-1, n-1) =$$
$$= b \vee g_1(m, n-1) = b \vee g_1(m+1, n-1) = b \vee g_1(m-1, n) =$$
$$= b \vee g_1(m+1, n) = b \vee g_1(m-1, n+1) = b \vee g_1(m, n+1) =$$
$$= b \vee g_1(m+1, n+1) = b],$$

где m, n — координаты точек границы ($a_{гр}$); a, b — возможные значения функции $g_1(m, n)$.

Решающее влияние на выбор конкретного алгоритма предварительной обработки оказывают результаты анализа требований, предъявляемых к СТЗ.

Алгоритмы выделения признаков изображений. На этапе предварительной обработки стремятся создать сжатое описание объекта в выбранной системе признаков, а затем проводится обработка полученного образа.

Выбор признаков осуществляется на основе анализа класса объектов, возможностей датчиков изображения по разрешению, требований к скорости обработки. Наиболее используемыми можно считать геометрические (топологические) признаки, к которым относятся площадь и периметр изображения, число отверстий, размеры вписанных и описанных относительно изображения фигур, число и расположение углов и т. п. В некоторых случаях наибольшее различие заключается в моментах инерции изображений заданного класса, тогда их выбирают в качестве признаков.

Геометрические признаки инвариантны относительно поворотов изображения в поле зрения. Инвариантность относительно масштаба изображения достигается нормированием по площади или периметру. Это важное положительное свойство сжатого описания изображений в системе геометрических признаков.

Наиболее просто вычисляется площадь изображения. Ее значение можно получить простым подсчетом числа элементов цифрового изображения при сканировании кадра. Инвариантность этого признака относительно масштаба изображения достигается нормированием по значению квадрата периметра. Периметр изображения вычисляется после выделения границ. Следовательно, вычислению периметра предшествует определение краев и линий изображения,

из которых затем нужно выделить граничные элементы. Наиболее просто это решается для бинарных цифровых изображений, когда граничные элементы выделяются на перепаде освещенности объекта и фона, т. е. на переходе от силуэта (единицы) к фону (нулю). В случае изображений с несколькими градациями яркости необходимо запоминать элементы контуров, которые выделяются на этом перепаде при любых значениях яркости изображения.

Для вычисления радиусов вписанных и описанных окружностей следует предварительно определить координаты геометрического центра изображения. Если их обозначить через (X_c, Y_c), а через M обозначить множество координат (x, y) элементов цифрового изображения, принадлежащих объекту (в отличие от фона), то координаты центра можно выразить как

$$X_c = \frac{\sum\limits_i \sum\limits_j \delta_{ij} x_{ij}}{\sum\limits_i \sum\limits_j \delta_{ij}};$$

$$Y_c = \frac{\sum\limits_i \sum\limits_j \delta_{ij} y_{ij}}{\sum\limits_i \sum\limits_j \delta_{ij}},$$

где δ_{ij} — функция, принимающая значения 1 или 0:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1; & (i,\ j) \in M \\ 0; & (i,\ j) \overline{\in} M \end{cases},$$

а x_{ij}, y_{ij} — дискретные отсчеты координат в поле цифрового изображения.

После определения X_c и Y_c вычисляются минимальное и максимальное расстояния (радиусы вписанной и описанной окружностей) до уже выделенных граничных элементов. Нормирование радиусов по корню квадратному из площади или по периметру приводит к инвариантности этих признаков относительно масштаба изображения.

Проще определяется длина сторон описанного прямоугольника. При сканировании изображения запоминаются максимальная и минимальная абсциссы $j_{\max}$ и $j_{\min}$, на которые в кадре попадает изображение объекта, и ординаты $i_{\max}$ и $i_{\min}$. Высота Y и основание X прямоугольника являются соответственно их разностью. Нормирование проводится также по квадратному корню из площади или по периметру.

Несколько сложнее найти моменты инерции изображения относительно его главных осей инерции. Однако промежуточные результаты вычислений могут быть использованы для определения ориентации объекта, что будет показано дальше.

Главные моменты инерции изображения J_1 и J_2 определяются через моменты инерции J_x и J_y относительно осей координат OX и OY, связанных с полем зрения, а также через смешанный момент

инерции J_{xy}. Если N — общее число элементов изображения объекта в поле зрения, $f(x, y)$ — функция распределения освещенности, то координаты центра тяжести изображения

$$\left.\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{N}\sum_i\sum_j x_{ij} f(x, y); \\ Y_c &= \frac{1}{N}\sum_i\sum_j y_{ij} f(x, y), \end{aligned}\right\}$$

где x_{ij} и y_{ij} — дискретные отсчеты координат на цифровом изображении.

Далее по известным значениям X_c и Y_c вычисляются моменты инерции изображения относительно координатных осей

$$\left.\begin{aligned} J_x &= \sum_i\sum_j (x_{ij} - X_c)^2 f(x, y); \\ J_y &= \sum_i\sum_j (y_{ij} - Y_c)^2 f(x, y) \end{aligned}\right\}$$

и смешанный момент инерции

$$J_{xy} = \sum_i\sum_j (x_{ij} - X_c)(y_{ij} - Y_c)(x, y).$$

Теперь можно определить главные моменты инерции

$$J_{1,2} = \frac{J_x + J_y}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4}(J_x - J_y)^2 + J_{xy}^2}.$$

Эти моменты принимают за отличительные признаки изображения объектов. Именно пары J_1, J_2 несут наибольшую информацию о различии объектов заданного класса.

В некоторых случаях целесообразно в качестве признаков использовать взаимное положение углов в контуре изображения. Такая система признаков наиболее эффективна при бинарных цифровых изображениях, поскольку обрабатывается информация о силуэте объекта, а углы, выявленные по перепадам освещенности поверхности объекта, не выделяются. В этом случае известны лишь координаты вершин углов силуэта на общем фоне.

Допустим, что контурные элементы найдены и пронумерованы на предыдущих этапах обработки. Один из алгоритмов основан на последовательной проверке фрагментов контура и оценке их кривизны. Проверяемый элемент является центральным для каждого шага проверки (рис. 4.5). Если кривизна фрагмента больше заданного порогового значения, то проверяемый элемент относится к угловым элементам контура. Однако для определения кривизны необходимо программно строить дугу, аппроксимирующую точки контура, а затем проводить вычисление радиуса ее кривизны. Эти операции предполагают значительный объем вычислений и замедляют обработку изображений. Более эффективна, но менее точна

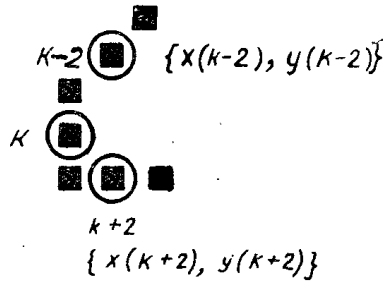


Рис. 4.5. Последовательность проверки элементов контура при выделении углов

оценка, основанная на нахождении модуля разности координат контурных элементов с номерами $k-2$ и $k+2$. Кривизна заменяется некоторой мерой отстояния конечных точек фрагмента друг от друга. Полученное отстояние сравнивается с заданным пороговым значением H, и по результатам проверки элемент с порядковым номером k может быть отнесен к угловым. Если абсциссы и ординаты контурных элементов с их номерами обозначить соответственно $x(k)$, $y(k)$, то правило выделения углов можно выразить так:

$$\{|y(k-2)-y(k+2)|+|x(k-2)-x(k+2)|\leqslant H\}\Rightarrow M(k)\in L,$$

здесь $M(k)$ — проверяемый на данном шаге элемент контура; L — множество угловых элементов анализируемого контура.

Пороговое значение H следует выбирать при анализе дискретных изображений объектов заданного класса. Вычисления удобно организовать в цикле по переменной k, причем два первых и два последних по нумерации элемента необходимо проверять вне цикла, поскольку для них невозможно задать элементы с номерами $k-2$ или $k+2$. Если выделены несколько соседних элементов контура в качестве угловых, то оператор селекции должен оставить только один из них углом контура.

По мере выделения угловых элементов контура и их селекции целесообразно присваивать выделенным углам порядковые номера. На следующем этапе обработки, когда формируется система признаков изображения, нумерация дает возможность последовательно определять эти признаки — отстояния углов друг от друга или их отстояние от заранее вычисленного геометрического центра. В результате будет получен вектор новых значений изображения в условной форме признаков $\mathbf{A}=(l_1, l_2, \ldots, l_n)$, где l_i — вычисленные отстояния, а n — число выделенных угловых элементов. Совокупность таких векторов $\mathbf{A}$ описывает все объекты заданного класса.

Основные методы идентификации и классификации изображений. Идентификация объектов в СТЗ чаще всего производится методами сравнения с эталоном. При этом, как правило, СТЗ решают одну из двух задач. Первая задача заключается в получении изображения одного объекта и сравнении со всеми эталонами заданного класса. По совпадению выбирается наилучший эталон и осуществляется идентификация объекта, а затем при необходимости находятся параметры его положения и ориентации.

Вторая задача заключается в получении изображения нескольких объектов и поочередном их сравнении с эталоном того объекта, который необходимо выделить. После этого вычисляются его положение и ориентация в рабочей зоне робота.

Полное совпадение объекта с эталоном в пространстве выбранных признаков, как правило, не достигается, поэтому задается допустимое различие между эталоном и изображением, в пределах этого различия и проверяется их совпадение.

Если обозначить исходное изображение объекта $F(i, j)$, эталон $E(j, i)$, а вычисленное различие T, то процедуру сравнения можно формально записать как

$$T = \sum_i \sum_j [F(i, j) - E(i, j)]^2;$$
$$T = \sum_i \sum_j |F(i, j) - E(i, j)|. \tag{4.16}$$

Здесь индексы i и j характеризуют положение элементов в дискретном цифровом изображении.

Совпадение эталона с объектом проверяется по правилу

$$D \geqslant T, \tag{4.17}$$

где D — заданное пороговое различие.

Если условие (4.17) не выполняется, то необходимо заменить эталон или перейти к другому изображению.

Покажем особенности метода сравнения с эталонами при использовании некоторых систем признаков. Если в качестве признаков выбраны площадь и периметр изображения, размеры вписанных и описанных фигур, момент инерции и подобные геометрические свойства, то следует учесть масштабирование и на этапе предварительной обработки нормировать изображения по какому-либо параметру. Например, площадь описанного прямоугольника или окружности нормируется квадратом периметра изображения, а периметр — значением корня квадратного из площади изображения.

Важным методом идентификации изображений по геометрическим или другим признакам служит метод построения графов решений. Его успешно применяют в тех случаях, когда в заданном классе изображений имеются объекты, которые невозможно различить по одному признаку изображения, и для правильного распознавания необходимо использовать несколько признаков. От метода сравнения изображения и эталона по векторам признаков метод графов отличается тем, что в нем на каждом этапе сравнения происходит отбор возможных решений. Таким образом, число возможных решений задачи распознавания уменьшается на каждом этапе сравнения.

Граф (или дерево) распознавания по геометрическим признакам представлен на рис. 4.6. Цифрами I, II, ..., X обозначены возможные решения — номера распознаваемых объектов. Буквы A, B, ..., Q в вершинах графа обозначают операторы, выделяющие определенные признаки изображения. Например, оператор A проводит классификацию изображения по длине и высоте описанного прямоугольника, операторы B и C — по площади, $DEFG$ могут быть операторами, проводящими классификацию по числу углов, H и Q — по отстоянию углов друг от друга. Граф может иметь

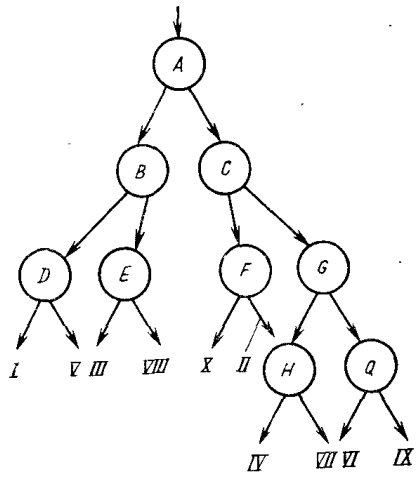


Рис. 4.6. Дерево распознавания

больше или меньше уровней, и содержание операторов может быть различным.

Модификацией метода сравнения с эталоном является корреляционный метод, основанный на вычислении взаимокорреляционной функции между эталоном и изображением. Классификация изображений проводится по результату: чем больше значение функции взаимной корреляции, тем с большей вероятностью эталон совпадает с изображением. Используя обозначения, принятые в выражении (4.16), формулу для вычисления взаимокорреляционной функции K можно представить в виде

$$K = \sum_i \sum_j F(i, j)\, E(i, j).$$

Максимальное значение взаимокорреляционной функции равно

$$\sum_i \sum_j [E(i, j)]^2.$$

Оно достигается при полном совпадении изображения с эталоном.

Нормированная взаимокорреляционная функция

$$R = \frac{\sum_i \sum_j F(i, j)\, E(i, j)}{\sum_i \sum_j [F(i, j)]^2}$$

при совпадении эталона с изображением достигает максимального значения, равного единице.

Использование корреляционного метода и метода прямого сравнения с эталоном предъявляет к процессу предварительной обработки изображений общие требования. Они заключаются в том, что изображение и эталон должны быть одинаково ориентированы, иметь равный масштаб и не быть сдвинутыми друг относительно друга в поле изображения. Другим свойством этих методов, которое следует учитывать, является необходимость использования большого количества эталонов. Это особенно важно в тех случаях, когда решаются задачи распознавания объектов изменением их проекции.

Алгоритмы вычисления параметров положения объекта. Под параметрами положения объекта обычно понимаются три значения координат его центра масс и три угла, задающие его ориентацию в трехмерном пространстве. Чаще всего в робототехнических задачах обрабатываются двумерные сцены, и под параметрами положения

понимают две координаты на плоскости и угол наклона оси симметрии объекта к одной из координатных осей.

Алгоритмы вычисления параметров положения объектов на двумерных изображениях сцены могут быть реализованы, если на изображении с несколькими объектами выделен один из них или если задано изображение с одним объектом. В простейшем случае для определения положения объекта достаточно вычислить координаты центра описанного прямоугольника. Определяются максимальная и минимальная абсциссы j_{max} и j_{min} и ординаты i_{max} и i_{min}, на которые в кадре попадает изображение объекта. В некоторых задачах требуется определять «центр масс» изображения, тогда вместо δ_{ij} используется функция яркости f_{ij}:

$$x_c = \frac{\sum_i \sum_j f_{ij} x_{ij}}{\sum_i \sum_j \delta_{ij}};$$

$$y_c = \frac{\sum_i \sum_j f_{ij} y_{ij}}{\sum_i \sum_j \delta_{ij}}.$$

Как уже указывалось, задача определения ориентации плоского изображения сводится к вычислению наклона его оси симметрии к осям координат.

Рассмотрим систему координат поля зрения XOY. Допустим, что система координат с началом в центре объекта X^*CY^* связана с осями симметрии X^0CY^0. Тогда центробежный момент инерции J_0 относительно системы X^0CY^0 равен нулю. Его выражение и выражения моментов инерции J_x и J_y относительно осей OX^0 и OY^0 имеют вид

$$J_0 = \sum_i \sum_j x_{ij} y_{ij} \delta_{ij} = 0;$$

$$J_y = \sum_i \sum_j (x_{ij} - x_c)^2 \delta_{ij};$$

$$J_x = \sum_i \sum_j (y_{ij} - y_c)^2 \delta_{ij}.$$

Переход от системы координат XOY к системе X^*CY^*:

$$x^* = x - x_c; \quad y^* = y - y_c.$$

Переход от системы X^*CY^* к системе X^0CY^0:

$$x_0 = x^* \cos\theta - y^* \sin\theta;$$

$$y_0 = x^* \sin\theta - y^* \cos\theta.$$

Если теперь, используя подстановку, записать выражение для момента J_θ в системе координат X^*CY^* и приравнять его нулю, то придем к уравнению

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2J_{xy}}{J_y - J_x},$$

где $J_{xy} = \sum_i \sum_j (x_{ij} - x_c)(y_{ij} - y_c)\delta_{ij}$.

Приведем в заключение еще одну формулу для вычисления наклона оси объекта. Эта формула широко применяется для определения наклона аппроксимирующих прямых и получена по методу наименьших квадратов:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\overline{xy} - \overline{x}\,\overline{y}}{\overline{x^2} - (\overline{x})^2}, \qquad (4.18)$$

где

$$\bar{x} = \frac{\sum_i \sum_j x_{ij}\delta_{ij}}{\sum_i \sum_j \delta_{ij}}; \quad \bar{y} = \frac{\sum_i \sum_j y_{ij}\delta_{ij}}{\sum_i \sum_j \delta_{ij}};$$

$$\overline{xy} = \frac{\sum_i \sum_j x_{ij}y_{ij}\delta_{ij}}{\sum_i \sum_j \delta_{ij}};$$

$$\bar{x}^2 = \frac{\sum_i \sum_j x_{ij}^2\delta_{ij}}{\sum_i \sum_j \delta_{ij}}.$$

Однако выражение (4.18) позволяет вычислить наименьший угол наклона осей объекта. Это означает, что если под меньшим углом к оси OX окажется наклоненной не продольная, а поперечная ось, то именно ее наклон и будет вычислен.

Алгоритмы обработки информации от сканирующего дальномера (СД) обзорно-информационной СТЗ. Информация от СД сообщается роботу, движущемуся в недетермированной среде.

Алгоритм обработки информации от СД об объектах манипулирования строится таким образом, чтобы выполнить основную задачу— обеспечение безопасности движения транспортного средства, работающего, например, в условиях цеха. Обработка информации проводится в три этапа.

1. С помощью пороговой фильтрации строится шкала препятствий $d(n)$, где признак d характеризует близость препятствия в данном направлении сканирования n внешней среды (рис. 4.7).

2. Проводятся обобщение и фильтрация выбросов шкалы препятствий $d(n)$, на основе которых выделяются области препятствий и проходов.

3. Производится оценка выделенных проходов и определение направления движения с учетом решаемой роботом задачи.

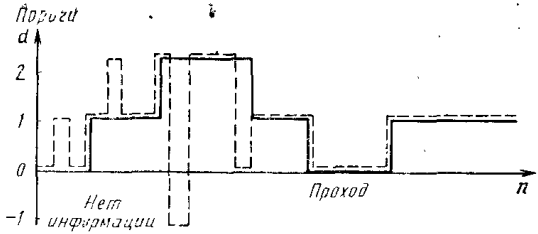


Рис. 4.7. Диаграмма фильтрации шкалы препятствий

Признак d может принимать следующие значения: —1 — нет информации в данном направлении; 0 — в данном направлении нет препятствий ближе 1,5 м; 1 — в данном направлении обнаружено далекое препятствие (измеренная дальность составляет 0,5—1,5 м); 2 — в данном направлении обнаружено близкое препятствие (измеренная дальность меньше 0,5 м).

На начальном этапе проводится очередное измерение и обрабатываются его результаты. Организация предварительной обработки диктуется техническими особенностями дальномера. В результате вычисляется текущий признак d_t и n для проведенного измерения. Далее осуществляется формирование текущей шкалы препятствий $d(n)$ следующим образом. После вычисления очередного текущего направления движения всем признакам шкалы присваивается значение минус 1. В дальнейшем полученное для данного направления d_t значение признака сравнивается с соответствующим значением признака шкалы препятствий $d(n)$, и в шкалу препятствий записывается более приоритетный из них (наибольший).

На следующем этапе проводится фильтрация шкалы препятствий. Целесообразны два алгоритма подобной фильтрации.

Первый из них производит фильтрацию признаков на основе статистической или приоритетной обработки в заранее заданных областях наблюдения (секторах). Второй алгоритм на основе шкалы препятствий формирует массивы данных $n(k)$, $d(k)$, исключая выбросы и объединяя лучи (или направления) с одинаковыми признаками, где k — номер прохода или препятствия.

Параллельно с указанной фильтрацией осуществляется формирование признака ситуации L, принимающего следующие значения:

0 — нет близких препятствий;

1 — близкое препятствие слева;

2 — близкое препятствие справа;

3 — близкое препятствие с обеих сторон.

Из всех возможных проходов для мобильного робота выбирается наиболее широкий или наименее удаленный от заданного направления движения. Алгоритм управления представлен на рис. 4.8. (Более подробно см.: Обзорно-информационная система макета мобильного робота/Д. Е. Охоцимский, В. А. Веселов, В. Г. Кузнецов и др. Препринт. 1982, № 45. М., ИПМ им. М. В. Келдыша.)

Основным режимом является движение вперед с огибанием препятствий. Разворот на месте осуществляется с постоянным визуальным контролем, при этом сектор обзора дальномера ориентирован так же, как и при движении вперед, — прямо по курсу, и разворот оканчивается, когда выбранный проход попадает в поле зрения СТЗ.

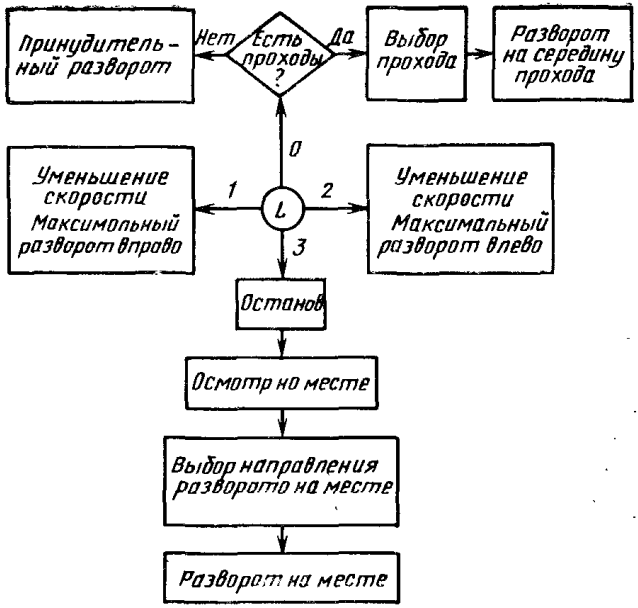


Рис. 4.8. Алгоритм управления с вычислением проходов

Это означает, что система управления может перейти на режим движения вперед с огибанием препятствий.

Целесообразна организация специальных маневров, в которых движение в заданном режиме осуществляется до тех пор, пока не будет удовлетворено некоторое условие, накладываемое на получаемую в ходе движения информацию о внешней среде. При подобных маневрах может быть организовано целенаправленное планирование перемещения робота без использования системы счисления пути, например, без одометрии.

Любой из таких маневров снабжается специальной программой-анализатором. Информация об окончании маневра или причине аварийного останова передается монитору системы управления. Подобная организация режимов движения характеризуется высокой эффективностью с точки зрения отладки и контроля.

Возможно использование и двумерных представлений видимой части среды для выбора направления движения транспортного робота.

Последовательность секторов сканирования, попадающих на опорную горизонтальную поверхность при движении сканирующего устройства вверх-вниз, может быть разбита в соответствии с углом поворота на несколько зон. В этом случае локальная информация о местности передается в виде матрицы $p\ (n_л n_з)$, где p — признак измерения в направлении; $n_л$ — номер луча в секторе сканирования; $n_з$ — номер зоны. Подобная матрица представляет собой локальную двумерную модель среды (типа карты).

Основные этапы обработки информации аналогичны рассмотренным выше для одномерного случая. Прежде всего матрица подвергается фильтрации с целью сглаживания и удаления случайных вы-

бросов. Для этого применяют алгоритм, основанный на методе логического усреднения.

После фильтрации определяются параметры движения по локальной карте. Параметры, задающие движение транспортного робота, — линейная скорость v центра масс и угловая скорость ω робота в горизонтальной плоскости. Отыскивается ближайшая к роботу строка локальной карты (зона), содержащая препятствия. (Если таковых нет, то считается $v = \max$, $\omega = 0$.) В этой строке выделяется проход (как в одномерном случае), причем соответственно определяется направление поворота (знак ω), а значение v находят из некоторой таблицы как функцию номера зоны. Эту функцию выбирают таким образом, чтобы робот успел развернуться к любому краю зоны $n_д$, поворачиваясь с максимальным ускорением ω.

Если ширина найденного прохода меньше допустимой, то значение ω определяют следующим образом. Для левой и правой половин локальной карты находят их заполненность препятствиями P_L и P_R:

$$P_L = \sum_{n_л^L} Q(n_л^L);\ P_R = \sum_{n_л^R} Q(n_л^R),$$

здесь $n_л^L$ — номера лучей левой половины карты при их просмотре слева направо от самого левого луча до первого луча, содержащего препятствия в первой зоне; аналогично $n_л^R$ — номера лучей правой половины карты при их просмотре справа налево от самого правого луча до первого, содержащего препятствие в первой зоне; $Q(n)$ — функция от номера луча, ее значение на единицу меньше номера той зоны, в которой для луча n оказалось препятствие. Величины P_L и P_R характеризуют площадь свободного места слева и справа от робота.

Соответственно значение ω выбирают в сторону максимального из P_L и P_R.

Алгоритмы обработки информации от СД о геометрической структуре недетерминированной среды применяются в СТЗ, например, для транспортных роботов.

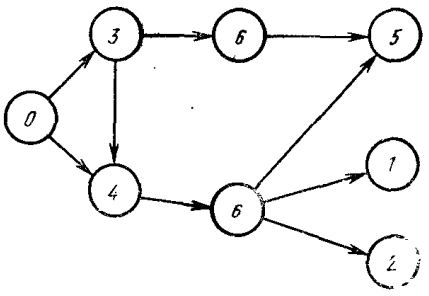
Известен следующий достаточно универсальный и экономичный способ подробного представления данных о внешней среде в виде информационного поля для СТЗ, построенных с использованием сканирующих. дальномеров.

Выбирается абсолютная система координат $OX_аY_аZ_а$. Формулы перехода из абсолютной в базовую соосную систему координат $OX_бY_бZ_б$ имеют простой вид:

$$x_1 = \left[\frac{x - x_0}{\varepsilon_x}\right];\quad y_1 = \left[\frac{y - y_0}{\varepsilon_y}\right];\quad z_1 = \left[\frac{z - z_0}{\varepsilon_z}\right],$$

где x_0, y_0, z_0 — начало базовой системы, а ε_x, ε_y, ε_z подбираются такими, чтобы единица в базовой системе была немного меньше средней погрешности измерения.

Рис. 4.9. Граф формирования признака



Модель среды представляет собой массив информационных элементов, в каждом из которых хранятся координаты измеренной точки в базовой системе координат X_6Y_6, оценка высоты поверхности в данной точке z, погрешность измерения ε, число проведенных в заданной точке измерений N и специальный признак p, о котором будет сказано ниже.

На каждую координату измеренной точки отводится по 10 разрядов. Это позволяет хранить информацию о поверхности из некоего куба K

$$K = \{0 \leqslant x_1 \leqslant 2^{10} - 1;\ 0 \leqslant y_1 \leqslant 2^{10} - 1;\ 0 \leqslant z_1 \leqslant 2^{10} - 1\}.$$

Считывание и запись информации в модель среды осуществляются с помощью специального программного блока доступа, к которому обращаются СТЗ и система построения движения робота.

Основными функциями блока доступа являются:

По заданным $\{x, y\}$ выдать $\{z, N, \varepsilon, p\}$.

По заданным $\{x, y\}$ записать указанные $\{z, N, \varepsilon, p\}$.

По заданным $\{x, y\}$ выдать $\{z, N, \varepsilon, p\}$ для соседних точек.

Отсутствие информации в элементе эквивалентно заданию $p = 0$, $N = 0$.

На основе указанных трех операций на более высоком уровне могут быть реализованы операции:

1. Статистическое уточнение информации о данной точке.
2. Выделение точек, попавших в данную область, определяемую некоторой сферой.
3. Выделение точек, попавших в область, определяемую траекторией движения манипулятора или частей робота.
4. Вычисление возможности установки объектов в заданную точку. В этом случае по соседним элементам вычисляется максимальный перепад высот в окрестности заданной точки. Если он меньше заданного порога, то установка объекта манипулирования возможна.

Значения признака p приведены на рис. 4.9. На этом же рисунке представлен граф возможных переходов признака p в элементе при работе системы. В начальный момент $p = 0$ (отсутствие информации). Этот признак в дальнейшем принимает либо значение $p = 3$, если возможна лишь оценка сверху высоты в данной точке, либо значение $p = 4$, если измерения проводились непосредственно в данной точке.

Если для системы построения движения робота потребовалось выполнить операцию 4 для данной точки, то этой точке присваивается временный признак $p = 6$, который по выполнении операции принимает значения 5, 1, 2:

$$(\exists_i)\,(p_i = 3) \vee (p_i = 0) \Rightarrow p_0 = 5;$$

$$[(\forall_i)\,(p_i = 4) \vee (p_i = 1) \vee (p_i = 2)] \wedge \left[\max_i |z_0 - z_i| \leqslant T\right] \Rightarrow \boldsymbol{p_0 = 1};$$

$$[(\forall_i)\,(p_i = 4) \vee (p_i = 1) \vee (p_i = 2)] \wedge \left[\max_i |z_0 - z_i| > T\right] \Rightarrow p_0 = 2;$$

(при этом $i = 1, 2, \ldots, 8$, т. е. выбираются соседи данной точки в области размером 3×3).

Рассмотренные программные средства обработки дальномерной информации о внешней среде показали высокую эффективность.

Глава 5 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ И ИХ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

5.1. Принципы построения систем управления адаптивных роботов

Адаптивные роботы — это сложные системы, способные выполнять различные задания в условиях недетерминированной среды. Система очувствления, являющаяся обязательным элементом адаптивного робота, обусловливает новые дополнительные функции системы управления, которые заключаются в следующем: принять от системы очувствления информацию о состоянии внешней среды, обработать ее, сформировать на основании этой информации управление. Все остальные функции программного обеспечения по управлению движением исполнительного устройства адаптивного робота по существу совпадают с соответствующими функциями программного робота.

Для иллюстрации этого обстоятельства рассмотрим пример, когда робот должен обойти некоторую последовательность точек позиционирования. Для программного робота такая последовательность является фиксированной, например, случай взятия деталей с движущегося конвейера и укладки их в тару. Для адативного робота, снабженного, например, СТЗ, последовательность обхода точек позиционирования зависит от показаний системы очувствления: робот может брать детали с конвейера и укладывать их в разную тару (задача сортировки). Тогда единственное различие систем управления (в той их части, которая обеспечивает исполнение задания) адаптивного и неадаптивного роботов заключается в наличии совокупности модулей, которые принимают информацию от СТЗ, обрабатывают ее (если СТЗ сама не обеспечивает необходимой обработки) и выбирают последовательность обхода уже имеющихся в памяти робота точек позиционирования. И коль скоро эта последовательность выбрана, дальнейшие действия по ее интерпретации, вычислению требуемого управления для адаптивного и неадаптивного роботов совпадают (рис. 5.1).

Это совпадение не является случайным фактором, характеризующим данный простой пример, оно является общей закономерностью, присущей адаптивным роботам с достаточно высокой степенью адаптации, и отражает иерархическую структуру системы управления адаптивного робота.

Иерархия — это такой способ организации системы, когда она представляется в виде многоуровневого набора взаимодействующих подсистем (называемых уровнями иерархии), каждая из которых

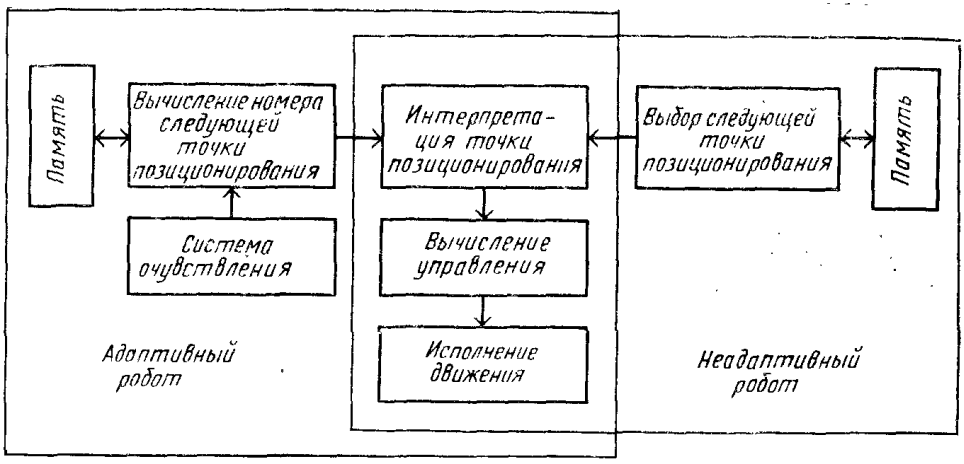


Рис. 5.1. Системы управления адаптивного и неадаптивного роботов

ответственна за решение ограниченной, строго определенной для подсистемы части задачи, и имеет доступ к ограниченной информации, требуемой только для решения этой задачи. Каждый уровень иерархии находится в подчиненном положении по отношению к вышестоящему уровню, принимая и исполняя поступающие от него команды и данные, являясь в то же время источником команд и данных для стоящего ниже уровня. Для верхнего уровня иерархии источником команд, как правило, является человек-оператор, формирующий цели на языке, принятом для этого уровня.

Уже в отношении простейших робототехнических систем, а именно программных промышленных роботов, можно утверждать, что в основе их организации лежат элементы иерархии. Действительно, в качестве нижнего уровня иерархии можно выделить уровень привода, обеспечивающий адекватную отработку управляющих сигналов, которые поступают к нему от вышестоящего уровня. Уровень привода является самостоятельной законченной подсистемой, которая гарантирует вышестоящему уровню исполнение генерируемых им команд. Следующий уровень иерархии служит для вычисления управляющих сигналов на основе данных, подготовленных ранее (на этапе обучения), и команд, которые вводит человек-оператор. Этот уровень занят выборкой описателей требуемых точек позиционирования, их анализом и преобразованием, построением интерполирующего многочлена и, наконец, передачей соответствующих данных для исполнения нижестоящему уровню привода. Реализация такой простейшей двухуровневой структуры (уровень привода и уровень вычисления управления, или, как его называют, тактический уровень) может быть самой разнообразной: например, управляющая микроЭВМ либо микропроцессор для каждого сочленения исполнительного механизма могут выполнять функции вычисления управления, а также брать на себя частично функции регулятора привода, реализуя цифровую корреляцию.

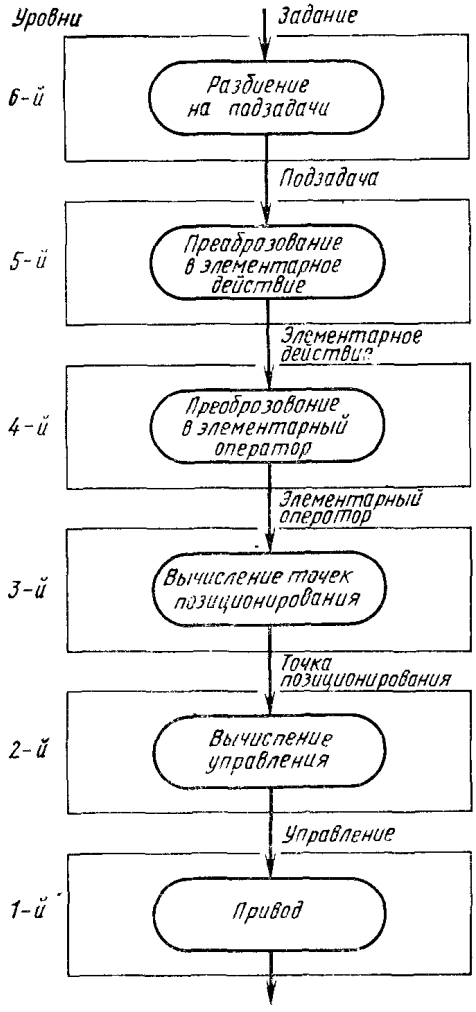


Рис. 5.2. Фрагмент системы управления, связанный с исполнением задания

Свойство адаптивных систем выполнять задание в условиях недетерминированной внешней среды обеспечивается при наличии в структуре системы по крайней мере двух модулей, решающих следующие задачи: обработку информации о внешней среде; генерацию последовательности управляющих сигналов и данных для нижестоящего уровня вычисления управления. Причем такое «наращивание» структуры при переходе от простых систем (например, программных роботов) к более сложным (адаптивным роботам) не влечет за собой коренных изменений ни в их аппаратной реализации, ни в структуре программного обеспечения.

Многоуровневая иерархическая организация системы управления адаптивного робота во многом определяется степенью адаптации робота. Так, для простейшей параметрической адаптации параметр, отражающий состояние внешней среды (например, вес поднимаемого груза или расстояние до объекта), может войти в выражение для закона управления каждой степенью подвижности, и тогда такая адаптация может затронуть только уровень привода или тактический уровень. С другой стороны, адаптация, близкая к искусственному интеллекту, требует большого числа уровней иерархии системы управления. Число уровней системы управления адаптивного робота зависит также от того, каким образом человек-оператор формулирует ему задание. Если, например, это задание формулируется путем перечисления точек позиционирования (с дополнительным вычислением недостающих координат с помощью системы очувствления), то система управления адаптивного робота будет мало отличаться от системы управления программного робота. Если задание формулируется на некотором проблемно-ориентированном языке, то число уровней будет тем больше, чем выше уровень языка. В последнем случае все функции, связанные с разбиением задачи на подзадачи,

планированием выполнения каждой задачи и т. д., берет на себя система управления робота.

На рис. 5.2 приведен один из вариантов организации фрагмента системы управления адаптивного робота, выполняющего некоторую сборочную операцию. Ниже кратко рассмотрены функции, которые выполняет каждый уровень иерархии.

Уровень 6. *Вход*: задание, сформированное человеком-оператором на некотором языке, доступном системе управления. *Выход*: последовательность подзадач, решающих в совокупности сформулированное задание.

Функции: разбиение сложной задачи на подзадачи.

Инструментовка: только ЭВМ; используемые на данном уровне методы — это методы теории искусственного интеллекта.

Уровень 5. *Вход*: подзадача. *Выход*: последовательность элементарных действий (или макрооператоров), выполнение которых обеспечивает решение подзадачи.

Функции: преобразование подзадачи в последовательность действий.

Инструментовка: та же, что и на уровне 6.

Уровень 4. *Вход*: элементарное действие. *Выход*: последовательность элементарных операторов, реализующих это действие.

Функции: расширение макрооператора на элементарные операторы.

Инструментовка: только ЭВМ; один из возможных способов получения элементарных операторов заключается в использовании методов макропроцессирования.

Уровень 3. *Вход*: элементарный оператор. *Выход*: описатели точек позиционирования либо некоторые команды и данные, управляющие внешними устройствами.

Функции: трансляция (либо интерпретация) элементарного оператора.

Инструментовка: только ЭВМ; входные элементарные операторы представляют собой инструкции языка управления движением, поэтому используемые на данном уровне методы — это по сути дела методы теории проектирования компиляторов.

Уровень 2. *Вход*: описатель точки позиционирования. *Выход*: управляющие сигналы на приводы подвижных сочленений.

Функции: декодировка входа; возможно преобразование координат (например, преобразование из декартовых координат в обобщенные для антропоморфной кинематики исполнительного устройства, рассмотренного выше); построение интерполяционного многочлена; генерация управляющих сигналов.

Инструментовка: ЭВМ, хотя часть этих функций может быть реализована аппаратно (например, генерация управляющих сигналов с помощью цифровых интеграторов).

Уровень 1. *Вход*: управляющие сигналы на приводы подвижных сочленений. *Выход*: изменение окружающей среды.

Функции: фактическое выполнение задания, сформулированного на уровне 6.

Инструментовка: функции цифровой коррекции может взять на себя ЭВМ (микроЭВМ либо микропроцессор), хотя это не является обязательным.

Примером с явно выраженными иерархическими уровнями системы управления робота служат адаптивные робототехнические комплексы, в состав которых кроме манипулятора входит еще и технологическое оборудование. Тогда к функциям системы управления добавляется еще синхронизация работы всех активных устройств, участвующих в выполнении технологической операции. Эту задачу решает логический уровень системы управления (см. п. 5.3).

Иерархическая организация системы управления имеет следующие преимущества:

1) упрощает анализ системы управления. Рассматривая каждый уровень в отдельности и отбрасывая несущественную для анализа специфику работы остальных подсистем, мы делаем соответствующую подсистему обозримой и доступной для анализа существующими методами;

2) позволяет реализовать различные подходы к синтезу систем управления, в частности, к проектированию программного обеспечения робота. Как правило, каждый уровень иерархии управления с позиции программирования — это процесс (или задача), развивающийся в некоторой вычислительной среде;

3) обеспечивает преемственность в проектировании адаптивных систем управления роботов. Как говорилось выше, переход от программного робота к адаптивному может не потребовать коренной перестройки системы управления, а лишь добавления необходимых модулей и согласования интерфейса между соседними уровнями иерархии.

Один из принципов построения адаптивных промышленных роботов состоит в широком использовании средств микропроцессорной техники, входящей как в состав системы очувствления, так и в состав системы управления.

Для адаптивного робота, представляющего собой чрезвычайно сложную систему, включающую большое количество разнообразной аппаратуры, важное значение приобретает разработка способов обмена, контроллеров связи и интерфейсных блоков.

5.2. Программное обеспечение систем управления адаптивных роботов

Функции управления адаптивным роботом выполняет вычислительная система, уровень сложности которой определяется уровнем адаптации робота: в простейшем случае это может быть один микропроцессор или микроЭВМ, для сложных адаптивных робототехнических систем в состав системы управления может входить вычислительная сеть (см. гл. 1). Использование ЭВМ как существенного элемента адаптивного робота определяется следующими обстоятельствами.

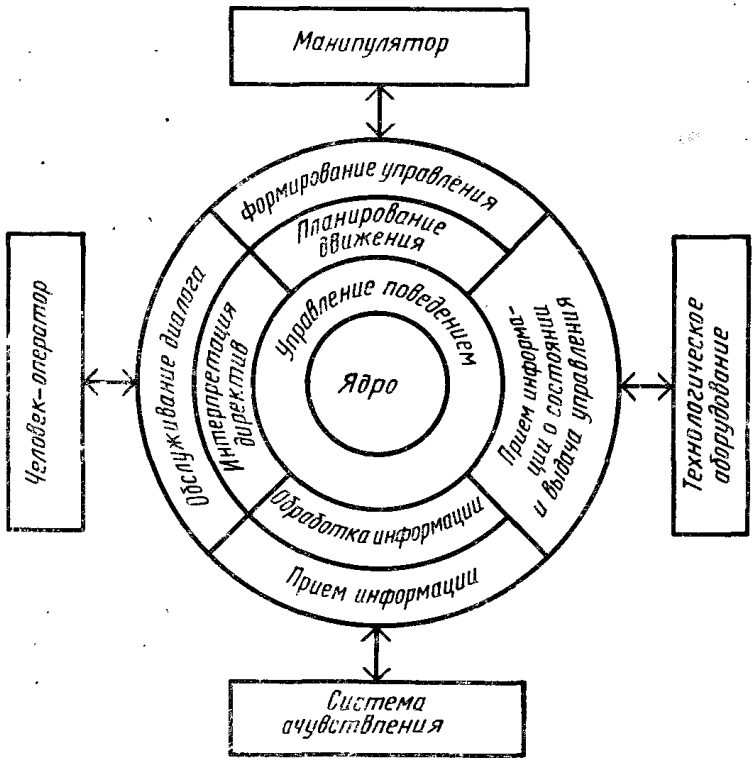


Рис. 5.3. Структура системы управления и ее функции

1. Функции, выполняемые системой управления, сложны и разнообразны, и когда говорят «система управления робота», то имеют в виду не только управление движением исполнительного устройства робота. В действительности та часть программного обеспечения робота, которая связана непосредственно с управлением движением, является меньшей по объему (например, по количеству соответствующих инструкций процессора), чем часть программного обеспечения, связанного с выполнением остальных функций.

2. Для адаптивного робота программа не представляет собой фиксированный, заранее заданный набор описателей движения (например, координат точек позиционирования манипулятора): программа движения (а иногда и поведения) вырабатывается в процессе исполнения задания. ЭВМ как аппаратное обеспечение системы управления робота предоставляет широкие возможности по его программированию.

3. И, наконец, одним из важных обстоятельств использования средств вычислительной техники является их постоянное удешевление, сопровождающееся ростом таких их показателей, как быстродействие, объем, память и мощность программных средств.

Таким образом, возникает задача разработки программного обеспечения системы управления адаптивного робота, которая позволит выполнить все указанные функции робота.

Система управления обслуживает следующие внешние по отношению к ней объекты: человека-оператора; манипулятора; систему очувствления; технологическое оборудование. Именно эти функции определяют структуру программного обеспечения (рис. 5.3).

Взаимодействие с человеком-оператором. Система управления обеспечивает диалог человека-оператора с роботом. Можно выделить следующие основные потребности человека-оператора в процессе его общения с роботом:

формирование рабочей программы. Эта программа может быть представлена либо в виде набора данных, описывающих точки позиционирования манипулятора и управляющие сигналы на технологическое оборудование (их называют кадрами), либо в виде набора инструкций на некотором проблемно-ориентированном языке. Первый способ формирования задания чаще используют для программных роботов, поскольку он по существу не обеспечивает адаптивного поведения робота;

редактирование рабочей программы. Эта функция программного обеспечения состоит в создании и модификации рабочей программы, причем, поскольку программа может представлять собой либо данные, либо инструкции (т. е. текст), то необходимо предоставить оператору возможность пользоваться как редактором данных, так и редактором текста;

хранение рабочих программ. Оператор должен иметь возможность создавать и поддерживать библиотеку рабочих программ, т. е. удалять программы, включать новые, переименовывать их и т. д;

исполнение и отладка рабочих программ. Эта функция программного обеспечения является одной из основных. Отладка рабочей программы заключается, например, в пошаговом ее исполнении и выдаче оператору информации о текущем состоянии исполнительного механизма, технологического оборудования или рабочего пространства;

выполнение сервисных функций. К таким функциям принадлежит, например, тестирование каналов связи с внешним оборудованием и, если необходимо, подстройка соответствующих параметров, выдача оператору информации о возможности программного обеспечения, калибровка системы очувствления и т. д.

Взаимодействие с манипулятором. Функции, выполняемые программным обеспечением в отношении манипулятора, заключаются в управлении им (см. 5.1).

Взаимодействие с системой очувствления. Соответствующий модуль программного обеспечения должен принять информацию от системы очувствления, обработать ее (если система очувствления сама не занимается обработкой или полученная от нее информация непригодна непосредственно для целей управления) и передать модулям, обеспечивающим управление.

Взаимодействие с технологическим оборудованием. Выполняемые программным обеспечением функции в отношении технологического оборудования и манипулятора совпадают, с той лишь разницей, что манипулятор представляет собой гораздо более сложный объект

с точки зрения управления, чем, например, сборочное приспособление, для управления которым, возможно, достаточно подать всего сигналы двух уровней, соответствующие двум состояниям: «открыто» —«закрыто». Однако принципиальной разницы здесь нет.

Кроме перечисленных выше функций, связанных с обслуживанием каждого из внешних объектов, существуют еще функции, выполнение которых нельзя отнести к одному из этих объектов:

согласованное управление всем внешним оборудованием в соответствии с показаниями системы очувствления (см. 5.3).

общесистемные функции. К ним относят обработку прерываний, возникающих в системе, управление вводом-выводом, загрузку системы, распределение вычислительных ресурсов, вычисление элементарных функций и т. д.

Таким образом, рассмотренные выше основные функции программного обеспечения позволяют сделать следующий вывод. Программное обеспечение представляет собой систему программирования, структура и состав которой совпадают со структурой и составом операционных систем реального времени. Ниже приведены основные общие фрагменты универсальных операционных систем и систем программирования роботов, проблемно-ориентированных операционных систем.

Система программирования адаптивного робота	*Операционная система реального времени*
Команды оператора	Язык управления заданием
Рабочее задание	Файловая система
Язык программирования робота	Языки программирования
Исполнение задания в реальном времени	Системные директивы реального времени
Параллельное развитие процессов	Мультизадачность
Обслуживание внешних устройств	Управление вводом-выводом

Такая аналогия позволяет воспользоваться для разработки программного обеспечения систем управления адаптивных роботов не только результатами, полученными в области теории операционных систем, но и самими операционными системами.

Таким образом, программное обеспечение адаптивного робота представляет собой объединение подмножества операционной системы выполняющего общесистемные (и некоторые другие) функции, и проблемно-ориентированной части, которая разрабатывается в соответствии с требованиями, предъявляемыми к адаптивному роботу. В качестве таких базовых операционных систем могут использоваться, например, РАФОС (RT-11), МОС РВ (RSX-11/S), UNIX для управляющих ЭВМ класса СМ-4 и «Электроника-60».

Поддержка мультизадачности является еще одним важным аргументом, подтверждающим установленную выше аналогию.

Мультизадачность — это свойство системы программирования обеспечивать одновременное выполнение нескольких задач (или, как иногда говорят, — развитие нескольких параллельных процессов). Эти задачи могут выполняться на одном процессоре, и тогда

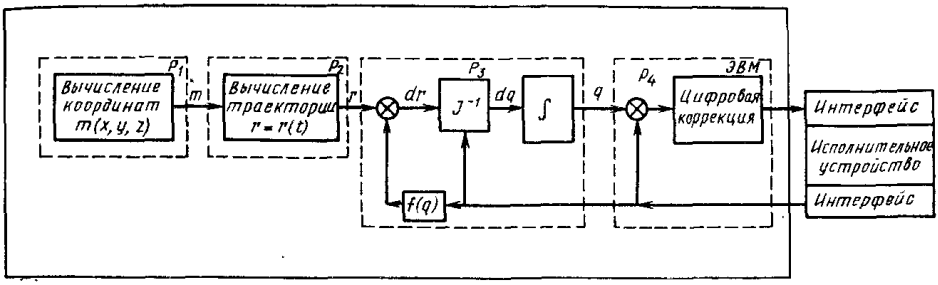


Рис. 5.4. Пример структуры многоуровневой системы управления робота

ядро программного обеспечения должно осуществлять перераспределение ресурсов, либо на разных процессорах.

Преимущества использования мультизадачного режима работы программного обеспечения:

1. Рациональное распараллеливание вычислительной процедуры предполагает естественную мультипроцессорную реализацию. Это означает, что можно предоставить каждому выделенному процессу свой собственный процессор.

2. Распараллеливание может повысить качество работы системы управления (в том числе и привода) при условии ее мультипроцессорной реализации.

3. Распараллеливание облегчает проектирование программного обеспечения. Один из принципов структурного программирования заключается в разбиении задачи на подзадачи.

Два основных режима работы системы управления робота — это режим обучения и режим исполнения. В режиме обучения (если он не связан с управлением движения манипулятора) мультизадачность, как правило, не используется, поскольку в этом случае нет необходимости в распараллеливании. В режиме исполнения есть явно выраженные процессы, которые могут развиваться параллельно. Приведем примеры процессов, которые могут развиваться параллельно. Приведем примеры процессов, которые могут развиваться параллельно в системах управления адаптивных роботов.

Пример. Задачей адаптивного робота с антропоморфным манипулятором является обход с сохранением ориентации захвата по некоторым траекториям точек позиционирования [4], координаты которых вычисляет система технического зрения. Схема управления робота показана на рис. 5.4, где приняты следующие обозначения: $m\ (x, y, z)$ — точка позиционирования, заданная координатами x, y, z; $\mathbf{r}\ (t)$ — радиус-вектор точек траектории; $\mathbf{q}$ — вектор обобщенных координат манипулятора; $J\ (\mathbf{q}) = f'_q$ — якобиан кинематического уравнения $\mathbf{r} = \mathbf{f}\ (\mathbf{q})$. Пусть система управления приводами манипулятора замкнута через ЭВМ (в частности, системы управления роботов «Puma»,«Pragma» выполнены по такой схеме). Здесь могут развиваться параллельно четыре процесса (рис. 5.5): P_1 — процесс, готовящий координаты точки позиционирования $m\ (x, y, z)$; P_2 — процесс, осуществляющий интерполяцию траектории по двум соседним точкам позиционирования; P_3 — процесс, формирующий управляющий сигнал на приводы подвижных сочленений манипулятора; P_4 — процесс, обслуживающий приводы (его можно назвать драйвером приводов). Все перечисленные выше процессы, развиваясь параллельно, обмениваются данными друг с другом. Способы обмена здесь могут быть различными. Например, процесс P_1

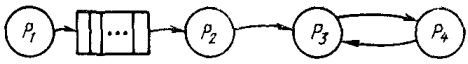


Рис. 5.5. Процессы, развивающиеся в системе управления

передает координаты точки позиционирования процессу P_2 через буфер, который устроен, как линейный список типа FIFO *, и в том случае, когда буфер заполнен, P_1 должен ждать, пока P_2 освободит его. Напротив, для обмена данными между процессами P_2, P_3 и P_3, P_4 нет необходимости устраивать такой буфер: процессы P_2 и P_3 просто обновляют передаваемые данные, не дожидаясь, пока процессы P_3 и P_4 (приемники этих данных) воспользуются ими. Это вызвано тем обстоятельством, что процессы P_2, P_3 и P_4 развиваются в масштабе реального времени.

Линейная программа (т. е. последовательное развитие процессов, например, $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_1 \rightarrow \ldots$) в данном случае не пригодна, поскольку на время вычислений, связанных с развитием процессов P_1, P_2 и P_3, приводы манипулятора будут разомкнуты (процесс P_4, связанный с обслуживанием приводов, не будет развиваться), и это может повлечь за собой не только ухудшение точностных характеристик манипулятора, но даже и потерю устойчивости. Поэтому процесс P_4 должен развиваться всегда, имея наивысший приоритет при распределении ресурсов: в однопроцессорных системах это достигается за счет перезапуска P_4 по сигналам таймера (например, с частотой 50 Гц для управляющих ЭВМ класса «Электроника-60»), а в многопроцессорных — за счет выделения этой задаче собственного процессора (как в упомянутых выше роботах «Puma» и «Pragma»).

Языки и системы программирования роботов. Существует два способа программирования робота: обучение и программирование с помощью некоторого алгоритмического языка. Первый способ отличается простотой и не требует высокой квалификации человека-оператора, но он не позволяет программировать сложные технологические процессы. Языковое программирование более перспективно, так как практически не имеет ограничений по уровню сложности создаваемых программ и допускает интерактивное управление роботами. Второе поколение роботов характеризуется уменьшением роли непосредственного обучения и существенным повышением роли программирования с помощью языковых средств при составлении задания.

Языки программирования не являются необходимыми при решении простейших задач, например перемещения манипулятора вдоль фиксированной траектории. Однако такие языки необходимы при формировании заданий на сборочные операции или операции, обучение которым представляет опасность для человека-оператора.

Пользователь может взаимодействовать с роботом с помощью ЭВМ на разных уровнях иерархии его системы управления, при этом каждому уровню будет соответствовать свой входной язык, адекватный задачам, решаемым на данном уровне иерархии. Поэтому языки программирования роботов можно классифицировать по способу задания и содержанию командной и ситуационной информации.

1. *Уровень отдельных степеней подвижности.* На исполнительном уровне системы управления человек-оператор задает движение манипулятора в терминах либо управляющих сигналов на каждую степень подвижности, либо значений обобщенных координат. По-

* FIFO — первым обслуживается первый пришедший (First In First Out).

следовательность этих данных соответствует некоторой траектории в рабочем пространстве, обеспечивающей выполнение требуемой операции.

2. *Уровень манипулятора*. На языке тактического уровня пользователь оперирует уже в рабочем пространстве манипулятора, он не должен заботиться о состоянии отдельных степеней подвижности, а должен задавать координаты и ориентацию захвата манипулятора в узловых точках траектории.

3. *Объектный уровень*. На языке стратегического уровня задание формируется путем указания операций, которые необходимо выполнить над объектом манипулирования.

4. *Уровень программирования в терминах «что сделать?» (а не «как сделать?»)*.

На языке высшего уровня формулируется все задание в целом, без детализации действий на низших уровнях иерархии.

Уровень абстракции разработанных и реализованных языков программирования роботов ограничивается уровнем «манипулятора».

Принципиальные преимущества программирования роботов с помощью текстового описания операций на специализированном языке состоят в возможности независимой подготовки программ, их корректировки и расширении при изменении условий задачи; при включении в состав языка операторов обработки сигналов датчиков и передачи управления такие языки становятся средством программирования адаптивных роботов, для которых неприменим способ непосредственного обучения. Кроме того, текстовая форма языка с использованием меток и включением комментариев обеспечивает доступность и понимание программ пользователем. К недостаткам языкового программирования следует отнести трудности формализации пространственных перемещений манипулятора, а на этапе создания специализированного языка — высокие требования к квалификации программистов-разработчиков языка и его системной поддержки, а также большой объем вычислительных ресурсов, необходимых для реализации соответствующих программ.

Известно два различных подхода к созданию языка управления роботом. Один из них состоит в разработке нового, специально предназначенного для программирования робототехнических задач языка. Представителями этого класса являются языки AL, AML, VAL, SIGLA, PAL. При таком подходе предполагается, в частности, что синтаксис языка приспособлен к описанию поведения робота, т. е. настолько понятен и экономичен, насколько это возможно. Альтернативным подходом является использование традиционных универсальных языков программирования высокого уровня для решения задач робототехники при условии, что выбранный язык позволяет определять необходимые структуры данных и управляющие команды манипулятора. Такой подход связан с реализацией проблемно-ориентированной надстройки над некоторым широко используемым языком универсального типа. Примером базового языка высокого уровня может быть язык С. Построенная на его основе система управления роботом ориентирована на использование

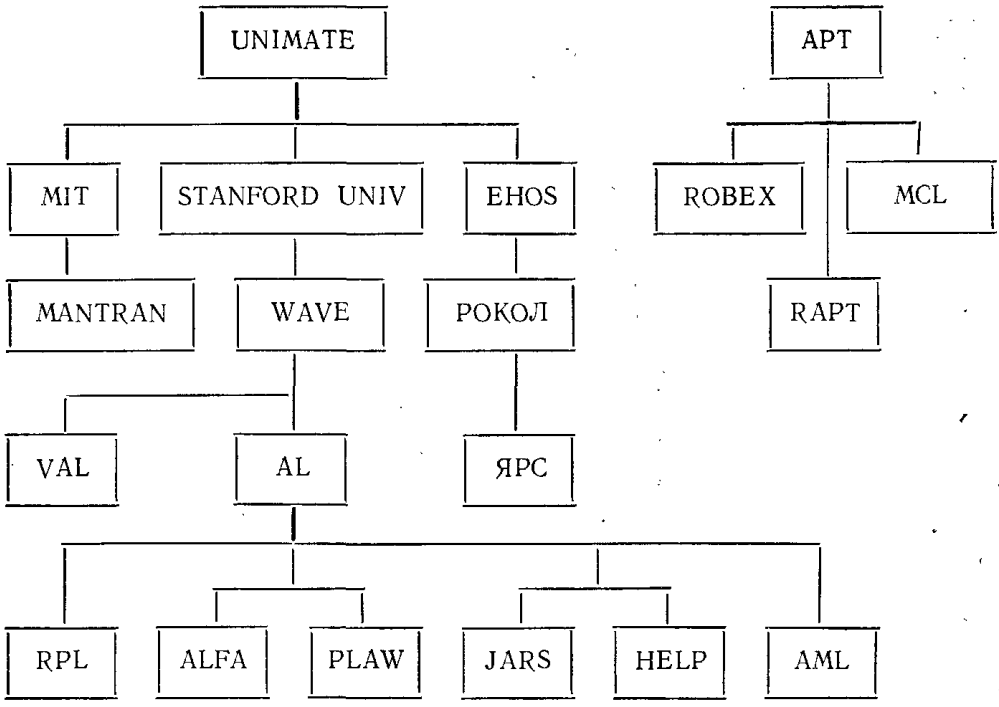


Рис. 5.6. Языки программирования роботов

библиотеки RCCL (Robot Control C Library), которая работает под управлением операционной системы UNIX.

Первые роботы действовали по принципу «обучение—повторение» без использования текстовых языков программирования. Этот способ был приемлем для реализации таких операций, как окраска распылением и точечная сварка, где единожды определенное задание исполнялось с многократным повторением.

Первая попытка создания языка для промышленного робота была сделана на фирме «Юнимейт» («Unimate», США). Управляющая программа состоит из последовательности пошаговых команд (двигательных инструкций) с указанием некоторых дополнительных функций, которые должны выполняться после каждого шага. Последовательные точки траектории задаются шестикомпонентным вектором значений обобщенных координат. Команды содержат управляющие сигналы по степеням подвижности, функции — открытие-закрытие захвата, временные задержки и т. д.

Создан целый ряд языков программирования роботов (рис. 5.6). К ранним разработкам относятся проекты «рука—глаз», из которых наиболее интересны языки Стэнфордского университета. В одном из них для управления манипуляционным роботом используется набор подпрограмм, написанных на языке высокого уровня и обеспечивающих выполнение следующих действий: включить манипулятор, перевести звенья манипулятора в заданное положение (аргу-

менты подпрограммы — шесть обобщенных шарнирных координат), раскрыть захват на заданную ширину, закрыть захват до упора и просигнализировать, если ширина раскрытия окажется меньше заданной. Программа управления имеет вид последовательности вызовов подпрограмм. Действия манипулятора программируются в декартовых координатах, поэтому в состав математического обеспечения включены процедуры однородного преобразования координат и решения обратной кинематической задачи. Использование декартовых координат облегчает построение модели среды, принятие решений и планирование траектории. В систему программирования включена только одна процедура высокого уровня — «переместить объект» с двумя параметрами — начальным и конечным положениями объекта. Взаимодействие с внешней средой ограничено лишь проверкой закрытия захвата при взятии объекта, поэтому при работе в реальной среде возникали трудности из-за действия внешних сил и моментов. Включение контуров обратных связей по силам и моментам позволило использовать сенсорную информацию и устранить указанные трудности. Однако язык программирования не рассчитан на работу с моделями, учитывающими силовые, моментные и тактильные взаимодействия.

Этих недостатков лишена система программирования WAVE, однако она не вышла за рамки эксперимента. Возникший как развитие системы WAVE язык AL объединил свойства WAVE и гибкость алголоподобных языковых структур. Основное назначение языка AL — координирование управления несколькими манипуляторами при выполнении сборочных операций.

Система AL написана на языке высокого уровня SAIL, но является самостоятельной системой. AL предназначена для двух уровней описания робототехнических систем (уровня движений и уровня планирования операций) и содержит как компилятор, так и интерпретатор, обеспечивающий интерактивные возможности и средства отладки. Управляющая программа может быть подготовлена на одной ЭВМ, а исполняться на другой и меньшей мощности.

Язык программирования AL включает традиционный набор операторов, обеспечивающих формирование блоков, циклов, рекурсий, макроопределений и т. д., и предоставляет возможность использования различных типов скалярных и векторных данных. Так, вводятся типы переменных, характеризующих координаты точки в декартовом пространстве, вращательное движение тела и преобразования координат при переходе от одной системы к другой; переменные могут быть снабжены размерностями, причем на основе базовых размерностей могут быть определены новые.

Возможность оперировать с действительными числами облегчает задачи обработки сенсорной информации в ходе выполнения программы. Для управления роботом предусмотрена команда MOVE в сочетании с разнообразными условными операторами, обеспечивающими модификацию траектории движения.

Язык позволяет управлять перемещением объектов в процессе сборки на основе развитой модели внешней среды. Динамическая

иерархическая модель представляет взаимосвязи между объектами с помощью однородных преобразований.

В задачах контурного управления, возникающих при работе с движущимися объектами, матрицы однородных преобразований позволяют достаточно быстро получать текущие значения требуемых координат. При этом целесообразно не планировать предварительно всю траекторию, а последовательно рассчитывать каждый ее участок в реальном времени.

Как язык реального времени, AL предоставляет средства задания параллелизма, синхронизации, обработки особых случаев; в программе могут использоваться переменные, зависящие от реального времени. Однако в нем не предусмотрены возможности выделения и защиты ресурсов, а также явные средства организации очередей и приоритетного обслуживания. Выполнение этих функций возлагается на пользователя, который может использовать и машинозависимые средства.

Помимо собственно языка, в систему программирования входят компилятор, системы для управления манипулятором в реальном времени и управления внешними устройствами; при выполнении задания широко используется сенсорная информация. Система AL ориентирована на организацию процессов сборки и способна одновременно управлять двумя манипуляторами. Задание системе выдается человеком-оператором в виде текста, при этом широко используются макросы, описывающие либо стандартные наборы движений, либо стандартные операции, определенные пользователем. В системе предусмотрены два терминала: первый — для ввода, компиляции, загрузки и исполнения задания; второй — для оперативной связи пользователя с управляющей ЭВМ и динамической отладки программы манипуляторов.

Компилятор содержит расширитель, на который поступают грамматически правильные фразы; он выполняет подстановки, используя макроопределения из библиотек. На выходе компилятора формируются загрузочные модули, которые могут быть исполнены на мини-ЭВМ (PDP-11/45).

В Японии была создана операционная система EHOS для управления движения манипулятора. Это — специализированная операционная система со своей собственной программой-супервизором, а также интерпретатором команд, программой-редактором и исполняющей программой. Подготовленное задание может быть немедленно выполнено исполнительной программой.

Команды системы EHOS разделены на пять групп. Команды первой группы выполняют переключение режимов работы операционной системы (интерпретация, редактирование, исполнение). Команды второй группы обеспечивают перемещение манипулятора в целевую точку; точка может быть задана обобщенными координами (шарнирными углами) механизма либо положением захвата — координатами и ориентацией. Команды ветвления и передачи управления составляют третью группу. Четвертая группа команд — команды редактирования. Последняя группа объединяет команды, связанные

с подготовительными операциями системы EHOS и с операциями управления манипулятором, не требующими данных. К этим операциям относятся начальное согласование углов, считанных с импульсных датчиков, со значениями управляющих сигналов, перевод манипулятора в некоторое исходное положение, считывание информации о текущем состоянии манипулятора, раскрытие и закрытие захвата и другие. Операционная система EHOS реализована на ЭВМ NEAC-3100 и использует память 32К 18-битовых слов.

Представляет интерес разработанный в СССР язык низкого уровня РОКОЛ для управления роботом. Этот язык явился расширенным вариантом языка операционной системы EHOS.

Язык РОКОЛ предназначен для облегчения процессов составления и отладки программ функционирования робота (ПФР), так как обеспечивает возможность пошаговой трансляции программ и исполнение программ в режиме диалога с оператором и их редактирования, а также для выполнения программы в реальном масштабе времени. Процесс трансляции не снижает быстродействия робота.

Язык обладает гибкой структурой, допускающей возможность его расширения; конструкции языка транслируются в последовательность наборов характеристических координат манипулятора.

Язык РОКОЛ включает операторы трех типов: основные операторы, операторы редактирования и управляющие операторы. Основным смысловым элементом языка является директива, которая представляет собой последовательность операций ПФР (основных операторов) для выполнения определенного действия. Каждая директива, впервые вводимая в ЭВМ, помечается именем, все последующие вызовы директивы осуществляются по этому имени. Таким образом, имя директивы представляет собой макрооператор, который может быть включен в состав других директив наравне с элементарными операторами.

Развитием языка РОКОЛ является язык ЯРС для робота с супервизорным управлением. Он был реализован на управляющей ЭВМ, М-6000, а также на мини-ЭВМ СМ-3 с подключенной к ней микроЭВМ «Электроника-60».

Язык ЯРС включает следующие группы операторов: основные операторы, вспомогательные первого и второго типа, операторы редактирования и управляющие операторы. По сравнению с языком РОКОЛ в языке ЯРС шире набор «роботоориентированных» операторов, которые составляют группу основных операторов и соответствуют типовым командам формирования движений. Основные операторы задают перемещения рабочего инструмента в заданную точку и заданную область либо произвольным образом, либо поступательно по прямой, либо на заданном расстоянии от фиксированной плоскости; закрытие или открытие захвата; изменение обобщенных координат руки до заданных значений.

Вспомогательные операторы первого типа представляют собой расширенные машинные команды; они позволяют выполнять арифметические и логические операции над операторами языка и их информационными полями, вспомогательные операторы выполняют

также пересылки информации в оперативной памяти ЭВМ и реализуют ветвления. Вспомогательные операторы второго типа обеспечивают ввод/вывод информации по требованию человека-оператора.

Реализация директив языка (последовательности основных и вспомогательных операторов), а также управляющих операторов и операторов редактирования осуществляется в процессе взаимодействия подпрограмм, входящих в программное обеспечение информационно-управляющего комплекса робота. Это взаимодействие поддерживается специализированной операционной системой.

В различных отраслях промышленности стали внедряться специально для них созданные несложные языки программирования роботов и робототехнических ячеек. Ряд разработчиков использует при этом имеющиеся универсальные языки программирования для создания наборов подпрограмм, ориентированных на управление роботами. К таким системам относятся RPL (на базе языка LISP), HELP, JARS (на базе PASCAL), широко используемый язык VAL (имеющий структуру BASIC).

Язык RPL (Robot Programming Language) разработан для облегчения создания, тестирования и отладки алгоритмов управления робототехнических систем, содержащих несколько манипуляторов, оснащенных устройствами очувствления и датчиками, и вспомогательное оборудование. Язык доступен для работы неквалифицированным (в смысле навыков программирования) пользователям. Поддерживающая его операционная система RPS (Robot Programming System) состоит из компилятора, который преобразует программу на RPL в коды интерпретатора, и интерпретатора этих кодов. Программа работает под управлением RT-11. Язык RPL организован в виде вызова подпрограмм. Создана соответствующая библиотека прикладных подпрограмм. Язык RPL ориентирован на работу с манипулятором «Puma 500» с визуальной подсистемой.

Язык JARS был создан для обеспечения управления роботами при сборке поверхностей солнечных батарей. Этот язык является модификацией языка PASCAL с многочисленными дополнительными, специфическими для робота типами данных, переменных и подпрограммами. JARS ориентирован на работу с манипуляторами Scheinman и «Puma-600».

Язык AML (A Manufacturing Language) фирмы «Ай-би-эм» (IBM, США) — хорошо структурированный, семантически мощный интерактивный язык, приспособленный к программированию различных роботов. Это многофункциональный базовый язык с возможностями простого расширения для применения его опытными программистами в различных областях. Интерпретатор базового языка определяет элементарные операции, такие, как преобразования векторов и других «объектов», требуемых для описания поведения робота. AML используется для управления сборочным роботом RS/1, имеющим манипулятор, работающий в прямоугольной системе координат, с активной силовой обратной связью с конца захвата; контроллер робота содержит мини-ЭВМ IBM Series/1 с памятью 192К байт и внешним накопителем на магнитном диске.

Язык HELP — часть системы «Allegro» фирмы «Дженерал электрик» (General Electric, США) — предназначен для управления сборочным роботом с манипулятором, работающим в прямоугольной системе координат. HELP — интерпретатор, основанный на языке PASCAL. В системе отсутствуют геометрические типы данных, движения задаются в терминах перемещений в сочленениях манипуляторов. Система допускает одновременное создание и исполнение нескольких задач. Контроллер системы реализован на ЭВМ LSI-11/02; сочленениями манипулятора управляют микропроцессоры Intel 8080A; периферийные устройства — дисплей, накопитель на гибких магнитных дисках, пульт обучения. Система «Allegro» может работать с несколькими манипуляторами (до четырех), имеющими в сумме не более 12 степеней подвижности.

В качестве базового для языка MCL (Manufacturing Control Language) использовался язык числового программного управления для технологического оборудования APT (Automatic Programmed Tool) фирмы «Макдональд Дуглас» (McDonald Douglas Corporation, США). Язык MCL состоит из первоначальной ключевой структуры APT и ряда инструкций, связанных с управлением технологической ячейкой. Язык MCL позволяет управлять роботами, устройствами очувствления, технологическим оборудованием, подающими механизмами и другими устройствами, работающими под управлением одной или нескольких ЭВМ и составляющими производственную роботизированную ячейку. Разные версии языка MCL реализованы на IBM-370 с памятью 1M байт и на PDP-11 с памятью 128K байт (работа в реальном времени); исполнительный механизм — манипулятор фирмы «Цинциннати Милакрон» (Cincinnati Milacron, США).

Язык ROBEX (ROBoter EXapt, ФРГ) создан на базе языка числового программного управления EXAPT. Модель рабочего пространства, используемая при программировании на этом языке, содержит и геометрические, и технологические данные. Язык позволяет описывать такие геометрические объекты, как точка, линия, круг, а также более сложные — цилиндр, шар. Эти описатели используются и для задания траекторий движения. Конструкции языка позволяют воспринимать только бинарную сенсорную информацию и содержат операторы условного перехода по сигналам от датчиков. Расширение возможностей программирования в ROBEX связано с применением метода непосредственного обучения для формирования узловых точек траектории манипулятора.

Целый ряд несложных языков программирования промышленных роботов построен на принципе комбинированного формирования программы действий, т. е. основа программы составляется заранее на некотором тестовом языке, а геометрические параметры и данные, связанные с реальным технологическим процессом, вводятся человеком-оператором непосредственно «на рабочем месте» манипулятора. К таким языкам относятся ALFA (A Language For Automation) и PLAW (The Programming LAnguare for Welding robot).

На производстве пользователь робототехнических систем обычно имеет хорошее представление о технологическом процессе и ограни-

ченные познания в области вычислительной техники и программирования. Для компенсации такого положения и удовлетворения требований перепрограммирования роботов используют язык управления высокого уровня ALFA. Язык ALFA ориентирован на программирование транспортных и загрузочных операций (переустановка кинескопов на конвейере) робототехнического комплекса, который содержит манипулятор «Versatran», управляющую ЭВМ PDP-11/10 с памятью 8К 16-битовых слов, периферийные устройства, датчики и панель управления. Связь между человеком-оператором и ЭВМ осуществляется через терминал. Для хранения рабочих программ используется кассетный накопитель на магнитной ленте. Действия робота направляются блоками команд программ пользователя.

Процесс управления имеет три уровня: командный, алгоритмический и уровень динамического управления. Командный уровень выдает команды управления на языке ALFA в соответствии с моделью процесса в памяти ЭВМ и текущим состоянием процесса. На алгоритмическом уровне после получения параметров управления начинается выполнение соответствующего алгоритма как функции текущего состояния процесса и заданных параметров. На выходе этого уровня формируются входные сигналы для уровня динамического управления, который, в свою очередь, задает перемещение руки, действия захвата и т. д. Командный и алгоритмический уровни, модели процесса, робота и состояние процесса составляют содержание управляющего математического обеспечения, реализованного на ЭВМ. Средства реализации динамического уровня находятся вне ЭВМ и составляют содержание аналогового управления. Сигналы о положении руки передаются по каналам обратной связи на верхние уровни и используются, в частности, на алгоритмическом уровне для контроля исполнения заданных движений.

Обучение робота выполняется в интерактивном режиме. Предварительно составляется программа пользователя, которая содержит последовательность команд на языке ALFA, задающую действия манипулятора. Единственно недостающая в программе информация — координаты узловых точек траектории — вводится при обучении робота. Для этого программа пользователя покомандно считывается из памяти, манипулятор вручную переводят в желаемое положение и выдается команда ввода координат.

Язык программирования PLAW для сварочного робота разработан в Японии. Как и в системе ALFA, программирование робота выполняется в два этапа: сначала в память ЭВМ вводится текст программы, а затем методом непосредственного обучения задаются положения сварочной головки, закрепленной в захвате робота. При формировании траектории между запомненными опорными точками на этапе исполнения возможна линейная и круговая интерполяция.

Система VAL (Variable Assembly Language) создана на фирме «Юнимейшн». Она включает язык программирования и операционную систему, ориентированные на использование с роботами фирмы «Юнимейшн».

Пользователь системы VAL — инженер-производственник, для которого знать программирование желательно, но не обязательно. Язык имеет структуру BASIC, дополненную инструкциями для управления роботом.

Основное требование, предъявляемое к системе, — обеспечение высоких интерактивных возможностей, поэтому VAL построена по принципу интерпретации. Команды монитора, относящиеся к верхнему уровню, сразу интерпретируются и исполняются, а шаги программы пользователя транслируются и запоминаются в компактной внутренней форме, которая может быть вызвана и интерпретирована в ходе исполнения программы.

Система VAL включает интерактивный редактор, интерпретатор, отладчик, исполняющую систему, систему сохранения программ пользователя. Программа редактор позволяет создать новые программы и модифицировать существующие (добавлять и вставлять новые шаги, удалять или заменять имеющиеся).

Обучение последовательности целевых положений манипулятора выполняется: по команде с пульта ручного управления манипулятором при непосредственной установке оператором требуемых положений; с пульта оператора в виде идентификаторов местоположений, при этом числовые значения идентификаторов могут быть определены либо в режиме редактирования, либо по специальной команде монитора в интерактивном режиме. Сформированная программа пользователя может выполняться однократно и многократно. При отладке возможно исполнение отдельных шагов программы и останов программы на заданном шаге либо по команде с пульта, либо при появлении ошибок. После устранения ошибки исполнение программы может быть продолжено. В числе отладочных средств VAL имеется команда, позволяющая уменьшить скорость выполнения как всей программы, так и отдельной инструкции.

Выполнение операций в VAL происходит в двух режимах: оперативном и фоновом. Команды, вводимые с пульта оператора, обрабатываются как фоновые. В оперативном режиме выполняется программа пользователя и осуществляется управление манипулятором. Такое разделение позволяет использовать команды монитора во время прогона программы. При этом оператор в ходе исполнения программы может изменять положения целевых точек, а также запрашивать информацию о текущем состоянии системы. Рабочая программа может модифицироваться при движении манипулятора с помощью интерактивного редактора.

В системе VAL предусмотрено три вида формирования движений:

1) от точки к точке — на каждую степень подвижности выдается управление, независимое от положения остальных степеней. При таком способе максимально используются потенциальные возможности приводов — время движения и значение перемещения по каждой степени минимально возможные, но при этом непредсказуем вид траектории конца исполнительного механизма, кроме того, быстрые разгон и торможение некоторых приводов могут сообщить нежелательное ускорение объекту управления;

2) задание интерполирующего закона изменения шарнирных углов на интервале между начальным и конечным положениями. Такой способ обеспечивает перемещение инструмента по контролируемой, заранее известной траектории, но в декартовой системе координат траектория оказывается сложной пространственной кривой;

3) интерполяция в пространстве абсолютных координат с пересчетом к значениям шарнирных углов. При этом траектория, спланированная заранее, отрабатывается точно, но расходуется большее время по сравнению с предыдущими способами, и шарнирные углы имеют сложный характер изменения.

В языке программирования VAL используется концепция фреймов (каждая позиция определяется соответствующей системой координат, которая сдвинута и повернута относительно абсолютной системы координат — базового фрейма). Однако этот язык допускает модификацию фрейма только путем сложения его радиуса-вектора с постоянными величинами; преобразование фреймов за счет вращения и других операций не предусмотрено. Язык допускает обработку только бинарных сигналов от датчиков. Программа состоит из последовательности шагов, каждый шаг содержит метку (необязательную), название инструкции и список аргументов инструкции.

Представляет интерес отечественная специализированная операционная система и проблемно-ориентированный язык программирования манипуляционного робота, широко использующий аппарат макроопределений (см. п. 5.5). Инструментальный комплекс построен на базе управляющей мини-ЭВМ СМ-4 с развитой периферией и позволяет создавать и отлаживать разнообразные программы пользователя. В промышленной системе эти программы исполняются с помощью микроЭВМ «Электроника-60».

В табл. 5.1 приведены сравнительные характеристики рассмотренных языков программирования роботов.

К числу важнейших требований, которым должен удовлетворять язык программирования для адаптивных промышленных роботов, можно отнести простоту языка и его доступность для понимания пользователем и в то же время способность к расширению и модификации, которые позволяют опытным программистам реализовать сложные действия и законы управления. Конструкции языка должны обеспечивать возможность в полной мере управлять движениями манипулятора, причем в реальном масштабе времени, воспринимать информацию с датчиков (в том числе тактильную, силовую, моментную, телевизионную), обрабатывать ее и при необходимости модифицировать управляющие программы. Язык должен допускать групповое управление манипуляционными роботами, а также элементами робототехнических ячеек. В системах управления роботами важны также вопросы системной поддержки, т. е. построения некоторого операционного окружения, обеспечивающего взаимодействие с пользователем, возможности создания, редактирования, отладки и исполнения программ управления.

Таблица 5.1

Характеристика	AL	AML	HELP	JARS	MCL	RPL	VAL
Тип языка: подпрограммы				*		*	
расширение					*		
новый язык	*	*	*				*
Тип геометрических данных: фреймы	*			*	*		*
углы в сочленениях		*		*			*
векторы	*	*		*	*		
преобразования	*			*	*		*
вращения	*			*	*		
Способность к управлению несколькими манипуляторами	*		*		*		
Типы движения: координатно-шарнирное «от точки к точке»	*	*	*	*		*	*
прямолинейное между двумя точками	*			*	*	*	*
с интерполяцией сплайнами через несколько точек	*		*	*		*	*
Управляющие инструкции: метки		*	*	*	*	*	*
if—then	*	*	*	*	*	*	*
if—then—else	*	*	*	*	*	*	
while—do	*	*	*	*	*	*	
do—until	*	*		*		*	
case	*			*		*	

Продолжение табл. 5.1

Характеристика	AL	AML	HELP	JARS	MCL	RPL	VAL
for	*	*		*		*	
begin—end	*	*		*	*		
cobegin—coend	*		*		*		
procedure (function) subroutine	*	*	*	*	*	*	*
Устройство очувствления: зрительное	*	*	*	*	*	*	*
силовое	*	*	*				
концевые выключатели	*	*		*	*	*	*
Модули системной поддержки: текстовый редактор	*	*	*	*		*	*
файловая система	*	*	*	*		*	*
интерпретатор	*	*	*			*	*
компилятор	*			*	*	*	
имитатор	*	*			*		
MACRO	*		*		*		
командные файлы				*		*	
регистрация сеансов связи	*						
регистрация ошибок	*						
функции HELP	*	*					
начальный обучающий диалог		*					

5.3. Логическое управление адаптивными роботами

Для выполнения любой технологической операции, кроме манипулятора как исполнительного устройства робота, требуется дополнительное оборудование (сборочные приспособления, станки, прессы, конвейеры, ориентирующие устройства и т. д.). С этой точки зрения робот — это лишь элемент (хотя и важный) производственной ячейки. Такой подход является обоснованным в связи с внедрением гибких автоматизированных производств, где в полной мере реализован принцип разделения функций между исполнителями. Групповое управление служит примером согласованной работы нескольких манипуляторов, участвующих в одном технологическом процессе.

Способ управления адаптивным робототехническим комплексом или несколькими комплексами, в состав которых кроме манипулятора входит еще и ряд активных устройств, основан на формализации описания таких робототехнических систем как логической сети, состоящей из конечных автоматов. Такой подход позволяет не только анализировать работу, но и проектировать соответствующее программное обеспечение ЭВМ как инструмент для реализации системы управления.

Конечный автомат. Пусть конечный автомат описывается следующим образом:

$$K = \{U,\ X,\ Y,\ \varphi,\ \psi\}, \tag{5.1}$$

где $U = (u_1,\ u_2,\ \ldots,\ u_l)$ — входной алфавит; $X = (x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_n)$ — множество состояний; $Y = (y_1,\ y_2,\ \ldots,\ y_m)$ — выходной алфавит; φ: $X \times U \to X$ — функция перехода; $\psi : X \to Y$ или $X \times U \to Y$ — функция выхода.

Конечный автомат рассматривается как некоторый объект, который может находиться в одном из состояний $x_i \in X$ до тех пор, пока на его вход не поступит какой-либо символ из входного алфавита $u_i \in U$. В этом случае автомат переходит в новое состояние, определяемое преобразованием φ как функция текущего состояния и входа. Кроме того, на выходе автомата появляется сивол y_i из выходного алфавита Y, при этом выходной символ определяется преобразованием ψ. Допустим также, что одним из элементов входного алфавита U является специальный символ ε, который мы будем интерпретировать как пустой символ. Он выполняет функцию постоянного присутствующего на входе автомата управляющего сигнала, так что, если аргументом функции перехода является ε, то это означает, что автомат совершает переход в соответствующее состояние, не дожидаясь его явного появления во входном потоке.

Конечный автомат называется автоматом Мура в том случае, когда его выходной символ не зависит от входного и определяется только текущим состоянием. В противном случае автомат называется автоматом Мили.

Если ввести время $t = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots$ и интерпретировать его как момент появления входного сигнала, то соотношения, описывающие

поведение конечного автомата, можно переписать следующим образом:

$$x(t) = \varphi(x(t-1),\ u(t-1));$$
$$y(t) = \psi(x(t)); \qquad (5.2)$$

для автомата Мура и

$$x(t) = \varphi(x(t-1),\ u(t-1)); \qquad (5.3)$$
$$y(t) = \psi(x(t),\ u(t-1))$$

для автомата Мили.

Задание конечного автомата заключается в описании каждого из элементов, входящих в определение (5.1), т. е. U, X, Y, φ, ψ. Функции φ и ψ могут быть заданы как в виде таблицы переходов, так и в виде графа. Строки и столбцы таблицы переходов помечены именами состояний и входных символов. Элементами таблицы являются имена новых состояний, в которые переходит автомат при подаче на его вход соответствующего символа, а также имена выходов. Граф, описывающий конечный автомат, представляет собой ориентированный граф, узлы которого помечены именами состояний и выходов, а ребра — именами входов.

Наличие в качестве элемента входного алфавита пустого символа ε позволяет несколько расширить понятие конечного автомата, так как разрешает появление на его выходе любого числа выходных символов. Действительно, пусть функции φ и ψ содержат следующие продукции:

$$\varphi\colon (x_0,\ a) \to x_1 \qquad \psi\colon x_1 \to \alpha$$
$$(x_1,\ \varepsilon) \to x_2 \qquad x_2 \to \beta$$
$$(x_2,\ \varepsilon) \to x_3 \qquad x_3 \to \gamma$$

Тогда подача на вход автомата символа a приведет к генерации на его выходе строки $\alpha\beta\gamma$. Этот способ позволяет реализовать параллельную работу нескольких устройств.

Заметим, что уравнения (5.2) и (5.3) можно рассматривать как уравнения, описывающие поведение некоторой дискретной динамической системы управления, если интерпретировать U, X, Y как числовые множества, которым принадлежит входное управляющее воздействие u, состояние x и вход y соответственно.

Пример. В качестве примера конечного автомата рассмотрим пресс, множество состояний которого состоит из двух элементов, отражающих положение подвижного элемента пресса: x_t — вверху, x_b — внизу. Входной алфавит состоит из двух символов u_t, u_b, первый из которых обеспечивает перемещение подвижного элемента вверх, а второй — вниз. Выходной алфавит также состоит из двух символов y_t и y_b, подтверждающих наличие подвижного элемента пресса в одном из допустимых состояний. Таким образом, имеем

$$U = (u_t,\ u_b);\ X = (x_t,\ x_b);\ Y = (y_t,\ y_b).$$

Функции перехода и выхода задаются следующими предписаниями:

$$\varphi\colon\ (x_t,\ u_b) \to x_b \qquad \psi\colon\ x_t \to y_t$$
$$(x_t,\ u_t) \to x_t \qquad\qquad x_b \to y_b$$
$$(x_b,\ u_t) \to x_t$$
$$(x_b,\ u_b) \to x_b$$

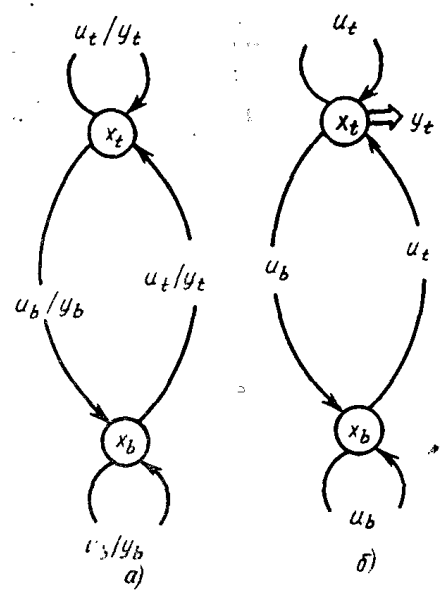


Рис. 5.7. Способ задания конечного автомата в виде графа в случае, когда выходной алфавит ассоциирован:
а — с входным алфавитом; *б* — с переходом в новое состояние

Таблица 5.2

Состояние	Вход	
	u_t	u_b
x_t	x_t, y_t	x_b, y_b
x_b	x_t, y_t	x_b, y_b

Нетрудно видеть, что пресс описывается как автомат Мура.

На рис. 5.7 и в табл. 5.2 приведены описания рассматриваемого конечного автомата. Граф, изображенный на рис. 5.7, *а*, ассоциирует выходные символы с входными, т. е. запись u_t/y_t означает появление на выходе символа y_t при подаче на вход символа u_t; граф на рис. 5.7, *б* связывает появление выходного символа с приходом в некоторое состояние. В рассматриваемом случае, т. е. в случае, когда выходной сигнал не зависит от входного, а определяется только текущим состоянием, изображение, показанное на рис. 5.7, *б*, является более естественным.

Цикловой манипулятор как конечный автомат. Спецификой циклового манипулятора является то, что он может находиться в конечном числе состояний. Например, манипулятор, кинематическая схема которого представлена на рис. 5.8, *а*, представляет собой механизм с тремя степенями подвижности, каждая из которых имеет по две точки позиционирования. Таким образом, область достижимости этого манипулятора представляет собой конечное множество, состоящее из восьми точек x_1, x_2, ..., x_8 (рис. 5.8, *б*). Если манипулятор имеет k степеней подвижности, каждая из которых содержит p_i точек ($i = 1, 2, \ldots, k$), то число точек n, куда может попасть захват, можно записать следующим образом: $n = \prod_{i=1}^{k} p_i$. Цикловые манипуляторы, как правило, снабжены путевыми датчиками, которые фиксируют попадание подвижного сочленения в каждое из допустимых положений. Таким образом, в рассматриваемом примере мы имеем шесть различимых сигналов y_{ij} (по два с каждой степени подвижности) с соответствующих датчиков, где $i = 1, 2, 3$ — номер степени подвижности, $j = 1, 2$ — номер датчика на степени. Кроме того, на каждую из степеней подвижности могут быть поданы управляющие сигналы u_{ij}. Эти сигналы имеют следующий смысл: u_{11} — движение вверх, u_{12} — вниз, u_{21} — влево, u_{22} — вправо, u_{31} — назад, u_{32} — вперед. Системы управления цикловых роботов содержат такие команды, хотя на самом деле полный набор команд таких систем

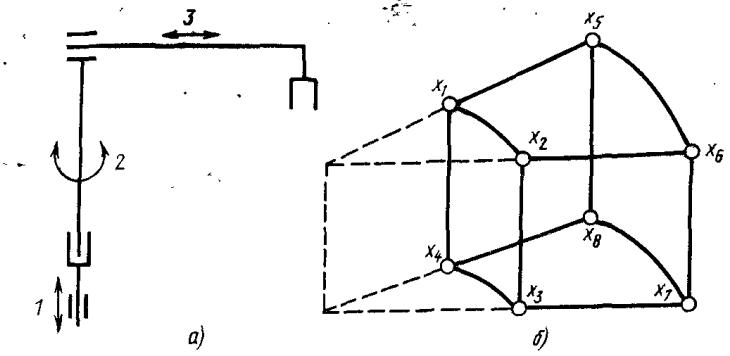


Рис. 5.8. Пример трехстепенного циклового манипулятора, рассматриваемого как конечный автомат:

а — кинематическая схема; *1*, *2*, *3* — степени подвижности; *б* — область достижимости

существенно богаче, в частности, они могут иметь команды условных и безусловных переходов. Цикловой манипулятор можно описать как конечный автомат, интерпретируя управляющие сигналы как входной алфавит, показания датчиков — как выходной алфавит. Тогда соответствующие множества, входящие в описание (5.1) автомата, будут выглядеть следующим образом:

$$U = (u_{11},\ u_{12},\ u_{21},\ u_{22},\ u_{31},\ u_{32});$$

$$X = (x_1,\ x_2,\ x_3,\ x_4,\ x_5,\ x_6,\ x_7,\ x_8);$$

$$Y = (y_{11},\ y_{12},\ y_{21},\ y_{22},\ y_{31},\ y_{32});$$

Функции перехода и выхода задаются следующими преобразованиями:

$$\begin{array}{lll}
\varphi: & (x_1,\ u_{12}) \to x_4 & \psi: \quad (x_1,\ u_{12}) \to y_{12} \\
& (x_1,\ u_{22}) \to x_2 & \qquad (x_1,\ u_{22}) \to y_{22} \\
& (x_1,\ u_{32}) \to x_5 & \qquad (x_1,\ u_{32}) \to y_{32} \\
& (x_2,\ u_{12}) \to x_3 & \qquad (x_2,\ u_{12}) \to y_{12} \\
& (x_2,\ u_{21}) \to x_1 & \qquad (x_2,\ u_{21}) \to y_{21} \\
& (x_{21},\ u_{32}) \to x_6 & \qquad (x_2,\ u_{32}) \to y_{32} \\
& \ldots\ldots & \qquad \ldots\ldots
\end{array}$$

На рис. 5.9 представлен граф, описывающий автомат, который был поставлен в соответствие трехстепенному цикловому манипулятору.

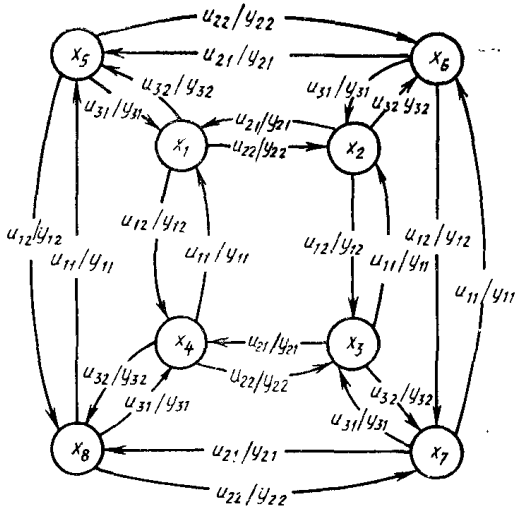


Рис. 5.9. Граф переходов конечного автомата, эквивалентного трехстепенному манипулятору

Рассмотрим еще один пример циклового манипулятора, который отличается от предыдущего тем, что имеет для одной из степеней подвижности три точки позиционирования вместо двух. Для упрощения примем число степеней подвижности равным двум (увеличение числа степеней подвижности не приведет к появлению качественно новой картины.) Кинематическая схема такого механизма приведена на рис. 5.10, *а*, а расположение точек позиционирования — на рис. 5.10, *б*. По аналогии с предыдущим примером имеем

$$U = (u_{11},\ u_{12},\ u_{21},\ u_{22},\ u_{23},\ u_{24},\ u_{25},\ u_{26});$$

$$X = (x_1,\ x_2,\ x_3,\ x_4,\ x_5,\ x_6);$$

$$Y = (y_{11},\ y_{12},\ y_{21},\ y_{22},\ y_{23}).$$

Граф, описывающий этот автомат, представлен на рис. 5.11. Заметим, что в рассматриваемом случае предполагаемое состояние x_1 может быть достигнуто из состояния x_2 за один шаг, минуя состояние x_5. Аналогичное предположение можно высказать в отношении состояний x_3, x_4 и x_6.

Таким образом, цикловой манипулятор с k степенями подвижности и p_i ($i = 1, 2, \ldots, k$) точками позиционирования на каждой степени можно описать как конечный автомат, имеющий n состояний, l элементов входного алфавита и m элементов выходного алфавита, где

$$n = \prod_{i=1}^{k} p_i;\ l = \sum_{i=1}^{k} p_i (p_i - 1);\ m = \sum_{i=1}^{k} p_i.$$

В часто встречающемся случае, когда $p_1 = p_2 = \ldots = p_k = 2$, имеем $n = 2^k$, $l = m = 2k$. Функция перехода конечного автомата определяется кинематической схемой манипулятора.

В рассмотренных случаях не учитывалось состояние захвата. Его можно учесть, расширив каждое из множеств U, X, Y, входящее в описание автомата, а также трансформировав функции перехода и выхода. Например, множество состояний X трехстепенного манипулятора будет в этом случае иметь вид

$$X^1 = (x_1^0,\ x_1^1,\ x_2^0,\ x_2^1,\ x_3^0,\ x_3^1,\ x_4^0,\ x_4^1,\ x_5^0,\ x_5^1,\ x_6^0,\ x_6^1),$$

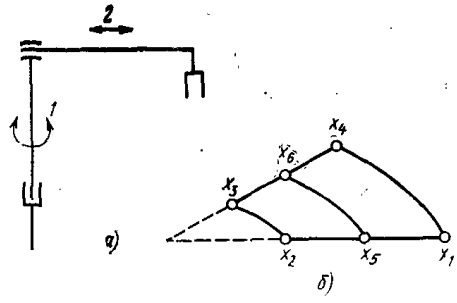


Рис. 5.10. Пример двухстепенного циклового манипулятора, рассматриваемого как конечный автомат:

а — кинематическая схема; *1*, *2* — степени подвижности; *б* — область достижимости

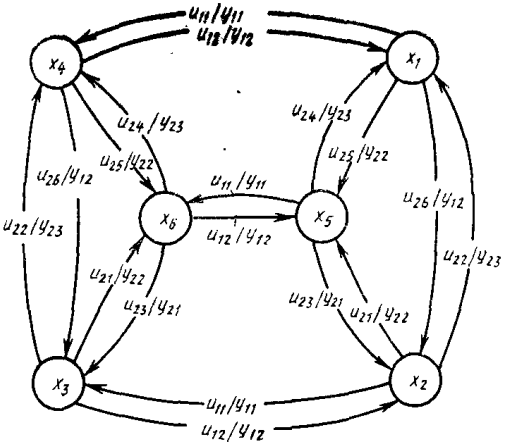


Рис. 5.11. Граф переходов конечного автомата, эквивалентного двухстепенному манипулятору

где верхний индекс 0 или 1 означает состояние захвата (открыт или закрыт — соответственно). Однако такой подход существенно усложняет описание автомата, а следовательно, и управление. Ниже, при описании конечного автомата, будет рассмотрен способ учета состояния захвата.

Управление цикловым манипулятором. Граф перехода конечного автомата отражает лишь возможные перемещения манипулятора, но не указывает, какую конкретную последовательность положений будет он проходить. Для того чтобы захват манипулятора обошел наперед заданные точки позиционирования, необходимо сформировать соответствующую последовательность управлений u_i. В терминах описания конечного автомата это означает, что требуется сгенерировать последовательность символов $u = \{u_i\}$ из входного алфавита U. Будем такую последовательность называть строкой: так, если $U = (0,1)$, то строками, которые можно подать на вход, являются следующие последовательности: 0101, 0000, 101011110 и т. д. Например, чтобы рассмотренный выше трехстепенной манипулятор обошел последовательность точек x_1, x_2, x_6 (см. рис. 5.8, *б*), необходимо на его вход подать следующую строку: $u_{11}u_{21}u_{31}u_{22}u_{32}u_{21}$.

Первые три элемента входного алфавита обеспечивают гарантированный перевод захвата манипулятора в состояние x_1, поскольку начальное положение захвата нам неизвестно. В том случае, когда требуется циклически повторить эту последовательность, т. е. осуществить следующее движение: $x_1x_2x_6x_5x_1x_2x_6x_5$ ..., а именно такого рода движения являются основными для цикловых манипуляторов, то аналогичным образом необходимо обеспечить периодичность входной строки, т. е. $u_{11}u_{21}u_{31}u_{22}u_{32}u_{21}u_{31}u_{22}u_{32}u_{21}$ ...

Однако такой подход вызывает серьезные трудности. Преодолеть их можно путем синтезирования регулятора для циклового манипулятора в виде конечного автомата, входной алфавит которого является подмножеством выходного алфавита циклового манипулятора и, наоборот, выходной алфавит — подмножеством входного

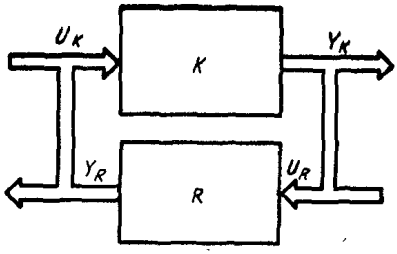


Рис. 5.12. Цикловой манипулятор и регулятор как конечные автоматы

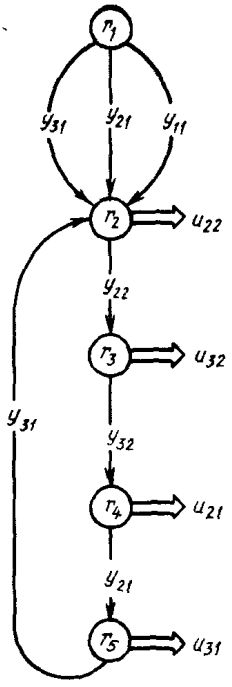


Рис. 5.13. Регулятор, обеспечивающий обход цикловым манипулятором (см. рис. 5.8) точек x_1, x_2, x_6, x_5

алфавита манипулятора. Более строго, это означает следующее. Пусть

$$K = \{U_K,\ X_K,\ Y_K,\ \varphi_K,\ \psi_K\}$$

есть автомат, описывающий цикловой манипулятор. Тогда автомат

$$R = \{U_R,\ X_R,\ Y_R,\ \varphi_R,\ \psi_R\}$$

описывает регулятор, если выполнены условия $U_R \subseteq Y_K$, $U_K \subseteq Y_R$. Здесь допускается наличие включения (а не строгого равенства), так как поведение манипулятора и регулятора может определяться не только выходными алфавитами соответствующих автоматов, но и некоторыми дополнительными факторами (рис. 5.12). Примером может служить регулятор для трехстепенного манипулятора, который обходит последовательность точек $x_1x_2x_6x_5$, как это было сформулировано выше; однако лишь для простоты предполагается, что известно начальное положение x_1 захвата манипулятора. Один из возможных регуляторов, инициирующих требуемую последовательность перемещений, описывается следующим образом:

$$U_R = (u_{21},\ u_{22},\ u_{31},\ u_{32});$$

$$X_R = (r_1,\ r_2,\ r_3,\ r_4,\ r_5);$$

$$Y_R = (y_{11},\ y_{21},\ y_{31},\ y_{12},\ y_{22},\ y_{32});$$

φ_R: $(r_1, y_{11}) \to r_2$ $\quad \psi_R$: $r_2 \to u_{22}$

$(r_1, y_{21}) \to r_2$ $\qquad r_3 \to u_{32}$

$(r_1, y_{31}) \to r_2$ $\qquad r_4 \to u_{21}$

$(r_2, y_{22}) \to r_3$ $\qquad r_5 \to u_{31}$

$(r_3, y_{32}) \to r_4$

$(r_4, y_{21}) \to r_5$

$(r_5, y_{31}) \to r_1$

Соответствующий граф регулятора показан на рис. 5.13.

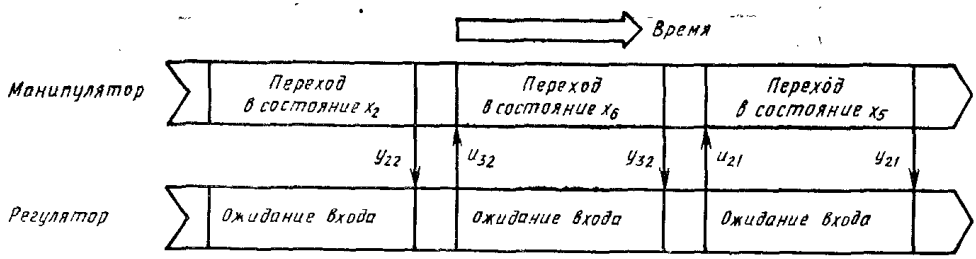


Рис. 5.14. Совместная работа манипулятора как объекта управления и регулятора

В рассматриваемом случае процесс обхода заданных точек позиционирования есть результат совместной работы двух автоматов: манипулятора (см. рис. 5.9) и регулятора (рис. 5.13). В начальный момент времени манипулятор находится в состоянии x_1, а регулятор — в состоянии r_1. Попасть в состояние x_1 манипулятор может из состояний x_2, x_4 или x_5, поэтому выходным сигналом (элементом выходного алфавита) может быть y_{11}, y_{21} или y_{31}. Любой из этих сигналов переводит регулятор в состояние r_2, в котором он генерирует выходной символ u_{22}. Управляющий символ u_{22}, будучи воспринятым манипулятором, переведет его в состояние x_2, при этом сработает соответствующий датчик, и на выходе появится сигнал y_{22}, который, в свою очередь, будет воспринят регулятором. Далее процесс обмена элементами алфавита между автоматами продолжается, в результате чего манипулятор будет двигаться по предписанной траектории. Совместную работу манипулятора и регулятора в процессе выполнения поставленной задачи иллюстрирует рис. 5.14.

Манипулятор с сервоприводом как конечный автомат. Если манипулятор снабжен сервоприводами, то его зона обслуживания содержит бесконечно много точек, куда можно перевести захват, в отличие от циклового манипулятора, рабочая зона которого имеет конечное число точек. Попытки описать манипулятор с сервоприводами как конечный автомат, на том основании, что в действительности число состояний, в которых может пребывать его захват, конечно вследствие цифровой природы управляющих сигналов на приводы подвижных сочленений, не приводят к успеху, поскольку число этих состояний остается слишком большим. Так, если предположить, что шестистепенной манипулятор управляется ЭВМ с помощью 10-разрядных цифроаналоговых преобразователей, то число состояний манипулятора можно грубо оценить как $(2^{10})^6$, что безусловно превышает все ресурсы управляющей вычислительной техники как по памяти, так и по быстродействию, и с этой точки зрения можно считать число состояний просто бесконечным.

Задача упрощается, если считать, что манипулятор является «обученным», т. е. имеются описатели точек позиционирования, число которых конечно и к которым можно обращаться, если им присвоить некоторые имена. Более того, при контурном управлении можно именовать целую траекторию, поскольку при использовании теории конечных автоматов процесс перехода из одного состояния

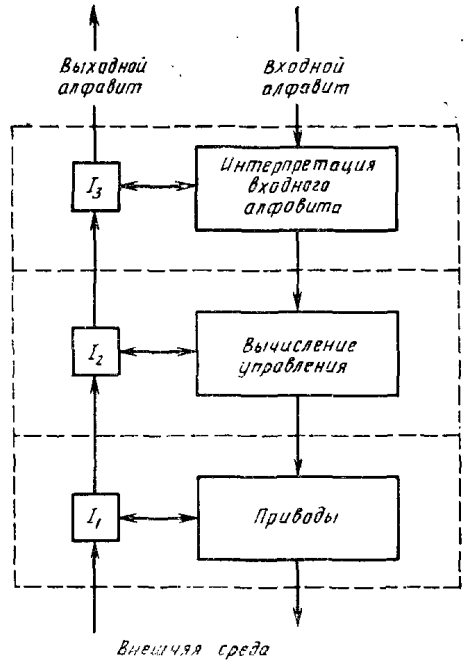


Рис. 5.15. Фрагмент системы управления робота, рассматриваемого как конечный автомат: I_1, I_2, I_3 — информационные системы соответствующих уровней иерархии

в другое не контролируется, а фиксируется лишь результат перехода.

Термин «обученный манипулятор» не является вполне законным, поскольку процесс обучения требует участия системы управления, которая является принадлежностью робота, а не манипулятора. Однако говорить «обученный робот» в данном контексте нам кажется неправомерным, поскольку для адаптивного робота этот термин предполагает более высокий уровень формирования задания, нежели перечисление точек позиционирования или траекторий.

В понятие «обученный манипулятор» мы вкладываем следующий смысл: соответствующий уровень иерархии системы управления робота (рис. 5.15) должен понимать и адекватно интерпретировать тот конечный (из-за конечности множеств, описывающих автомат) набор инструкций, который ему предписывается исполнить вышестоящим уровнем системы управления. Таким образом, мы рассматриваем как конечный автомат не только манипулятор с системой приводов, т. е. исполнительный уровень, но и уровни вычисления управления и интерпретации входных управляющих сигналов. Этот подход является весьма естественным с точки зрения наличия иерархии в структуре системы управления робота, поскольку не только не противоречит основным принципам этого способа организации системы, но и подтверждает необходимость их использования, а также конструктивность предложенного подхода к проектированию таких систем.

На самом деле рассмотренный выше цикловой робот также предполагался обученным, хотя это выглядело не столь явно: процесс обучения циклового робота состоит в настройке фиксаторов, ограничивающих движения манипулятора по каждой из степеней подвижности, однако ввиду относительной простоты этой операции ее часто упускают из вида. Тогда, если учесть это обстоятельство, исчезает разница между цикловым манипулятором и манипулятором с сервоприводом: ее не существует для уровня логического управления, который рассматривает тот и другой манипулятор как конечный автомат.

Единственный вопрос, который осталось здесь обсудить, — это построение выходного алфавита автомата. Для циклового робота этот вопрос решался естественным образом: элементы выходного

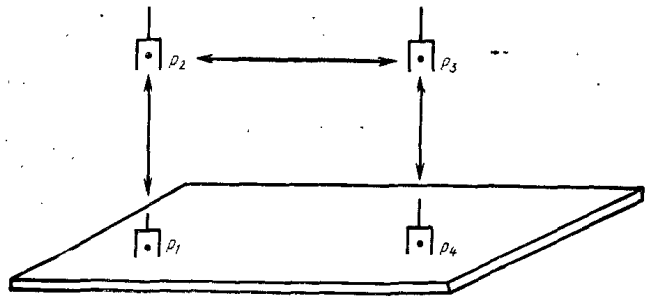


Рис. 5.16. Простое задание для робота

алфавита интерпретировались как сигналы путевых датчиков, установленных на каждой из степеней подвижности. Для манипуляторов с сервоприводами таких датчиков, которые подтверждали бы факт нахождения механизма в требуемом состоянии, не существует, однако аппаратурная реализация здесь не является обязательной: процедура подтверждения исполнения ранее поданной инструкции выполняется программно. Такой обмен информацией типа запрос—подтверждение является характерной чертой двух соседних уровней иерархии.

Таким образом, элементами выходного алфавита являются программно сформированные сигналы, подтверждающие прием, интерпретацию и обработку управляющих воздействий (входного алфавита).

Пример. Пусть один из фрагментов операции сборки, которую выполняет робот, заключается в выборке детали из накопителя и транспортировке ее в сборочное приспособление, и пусть p_1, p_2, p_3, p_4 — имена точек позиционирования, которые должен обойти манипулятор в процессе исполнения (рис. 5.16). В начальный момент времени манипулятор находится в состоянии x_0 (рис. 5.17, *а*), а регулятор (рис. 5.17, *б*) — в состоянии r_0. В этом состоянии регулятор генерирует сигнал p_1, который, будучи принят манипулятором, переводит его в состояние x_1.

Переход в состояние x_1 сопровождается следующей последовательностью действий, выполняемых программным обеспечением соответствующих уровней иерархии системы управления.

Шаг 1. Выборка описателей точки позиционирования p_1 (напомним, что манипулятор мы считаем обученным, поэтому эти описатели уже имеются в памяти в той или иной форме).

Шаг 2. Интерпретация описателей: точка позиционирования может быть задана либо своими абсолютными координатами, либо приращениями относительно предыдущего состояния, кроме того, может быть задан способ перехода в эту точку.

Шаг 3. Планирование траектории, вычисление управлений и выдача их на приводы подвижных сочленений.

Шаг 4. В случае прихода захвата манипулятора в целевую точку p_1 — генерация на выходе символа g, подтверждающего успешное выполнение задания.

Далее задание выполняется аналогично: взаимосвязанная работа двух автоматов обеспечивает последовательный перевод захвата в точки p_1, p_2, p_3, p_4, p_1, ...

Логическое управление адаптивным роботехническим комплексом. Все рассмотренные выше задачи управления могли быть решены стандартными способами. Например, формулировка задания на

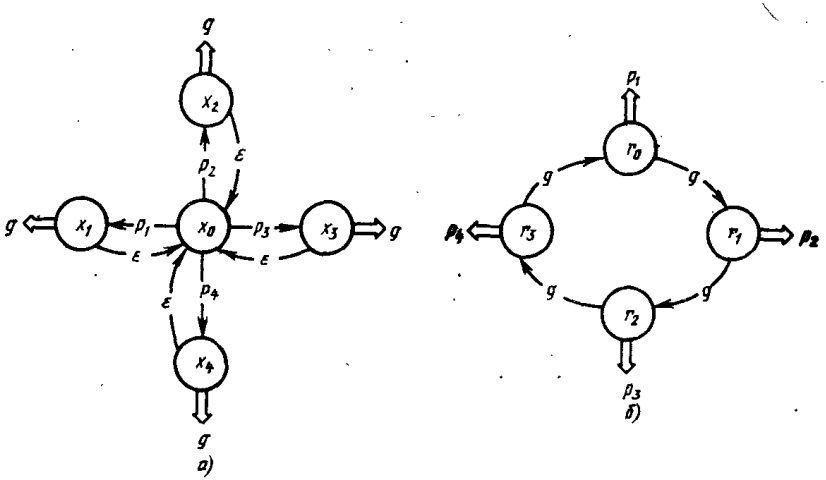


Рис. 5.17. Автоматы, обеспечивающие обход манипулятором точек p_1, p_2, p_3, p_4:
а — «обученный» манипулятор как объект управления; *б* — регулятор

одном из языков управления движением манипулятора может выглядеть так:

```
L1:  move P1;
     move P2;
     move P3;
     move P4;
     goto L1;
```

Однако на практике часто требуется управлять согласованной работой большой совокупности устройств (в том числе несколькими манипуляторами), когда управление, подаваемое на одно устройство, зависит от того, в каком состоянии находится совокупность других устройств. В таких случаях линейные программы, рассматриваемые как способ формирования задания по выполнению некоторой технологической операции, становятся совершенно неприемлемыми, так как невозможно предусмотреть все комбинации состояний устройств и, следовательно, сформировать требуемое управление ими. Кроме того, линейные программы не позволяют осуществить распараллеливание выполнения задания по различным активным устройствам. Задача обеспечения согласованного управления совокупностью активного оборудования, входящего в состав робототехнического комплекса (далее — «активных элементов»), является сложной, и решить ее можно, если описать каждый активный элемент как конечный автомат, построив для управления им соответствующий регулятор, который также является конечным автоматом. Таким образом, логический уровень системы управления робототехническим комплексом представляет собой сеть конечных автоматов, объединенных общими входами и выходами, при этом число таких автоматов определяется не только количеством активных эле-

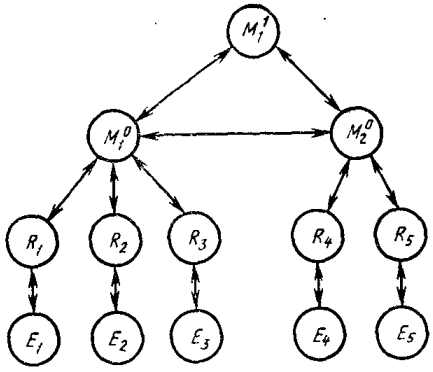


Рис. 5.18. Схема управляющей логической сети

ментов, но и сложностью задачи, решаемой робототехническим комплексом.

Пусть i-й активный элемент имеет описание

$$E_i = \{U_{E_i},\ X_{E_i},\ Y_{E_i},\ \varphi_{E_i},\ \psi_{E_i}\}.$$

Тогда, интерпретируя активный элемент как объект управления, построим конечный автомат

$$R_i = \{U_{R_i},\ X_{R_i},\ Y_{R_i},\ \varphi_{R_i},\ \psi_{R_i}\},$$

который назовем, как и раньше, регулятором, при этом входные и выходные алфавиты активного элемента и регулятора подчинены условию $U_{R_i} \subseteq Y_{E_i}$, $U_{E_i} \subseteq Y_{R_i}$. Регулятор управляет поведением активного элемента, принимая лишь информацию в виде символов его выходного алфавита. Для обеспечения согласованного управления совокупностью элементов введем еще ряд автоматов, называемых мониторами M_i^0, которые связаны с некоторым выбранным подмножеством регуляторов. Такая иерархическая управляющая структура может быть надстроена вверх мониторами M_i^k, $k = 1, 2 \ldots$ настолько, насколько это необходимо для эффективного управления комплексом. Так, на рис. 5.18 представлена логическая сеть, управляющая пятью активными элементами, при этом мониторы M_1^0 и M_2^0 управляют группами из трех и двух элементов соответственно, а монитор M_1^1 управляет всем комплексом в целом. Стрелками на рисунке обозначены потоки информации, которой обмениваются автоматы в процессе работы (эту информацию несут символы входных и выходных алфавитов). Обмен между мониторами M_1^0 и M_2^0 может быть удобен в тех случаях, когда генерируемое поведение активных элементов стандартное и не требует вмешательства вышестоящих уровней иерархии.

Рассмотренная выше логическая сеть может управлять активными элементами, входящими в состав робототехнического комплекса, обеспечивая их синхронную работу. При необходимости может быть сформирована логическая сеть, включающая активные элементы нескольких робототехнических комплексов, связанных выполнением общей задачи, что обеспечивает логическое управление не только производственной ячейкой, но и участком.

Как известно, адаптивные свойства придает роботу система очувствления, которая поставляет системе управления соответствующую информацию о состоянии внешней среды. С точки зрения рассматриваемого подхода можно выделить два типа данных, передаваемых системой очувствления: 1) данные о внешней среде, представляемые набором признаков, принимающих конечное число значений; 2) данные, число значений признаков которых бесконечно.

К первому типу данных относятся, например, показания тактильных датчиков. Поступающую от них информацию всегда можно интерпретировать как появление единственно возможного сигнала, свидетельствующего о наличии контакта захвата манипулятора, оснащенного тактильным датчиком, с некоторым объектом внешней среды.

СТЗ, работающая в режиме визуальной инспекции, также передает системе управления данные первого типа. Эти передаваемые данные, кодируемые, например, символами a и b, можно интерпретировать так: a — предъявленная сцена содержит требуемый объект; b — предъявленная сцена не содержит требуемого объекта. Режим распознавания также обеспечивает передачу системе управления данных, принимающих конечное число значений, например: a — предъявлен объект A; b — предъявлен объект B, ...; y — предъявлен объект Y; z — предъявлен незнакомый объект.

Ко второму типу данных относятся, например, показания силомоментных датчиков, дальномеров, показания СТЗ, работающей в режиме вычисления геометрических характеристик объектов сцены (координаты центра тяжести, ориентация), и т. д. Про каждую составляющую этих данных можно сказать, что соответствующий признак может принимать бесконечное число значений из некоторого промежутка (так, ориентация γ объекта, предъявленного СТЗ, удовлетворяет условию $\gamma \in (-\pi/2, \pi/2)$.

Процесс адаптации поведения робота, оснащенного системой очувствления, которая поставляет данные первого типа, также может быть рассмотрен в рамках теории конечных автоматов. Для этого необходимо интерпретировать систему очувствления как конечный автомат, выходной алфавит которого совпадает со значениями передаваемых признаков. Например, в рассмотренном выше случае работы СТЗ в режиме распознавания выходной алфавит соответствующего автомата имеет вид $Y = (a, b, \ldots, y, z)$. Здесь, однако, есть одно весьма важное отличие, которое заключается в следующем. До сих пор функция вход—состояние—выход предполагалась однозначной в том смысле, что каждой паре вход—состояние соответствует единственный символ выходного алфавита. В рассматриваемом случае на выходе автомата, описывающего систему очувствления и находящегося в определенном состоянии, при фиксированном входе может появиться любой символ из некоторого подмножества символов выходного алфавита a, b, ..., y, z. Такой автомат, у которого, в частности, каждому элементу выходного алфавита приписана некоторая мера, характеризующая вероятность его появления на выходе, называется стохастическим.

Появление такой недетерминированности в поведении автомата, описывающего систему очувствления, а следовательно, и всей управляющей структуры, вызвано тем, что эта структура реализует управление адаптивным роботом: в противном случае реализовывалось бы жесткое, заранее запрограммированное описаниями соответствующих автоматов поведение робота первого поколения, в отличие от адаптивного, поведение которого должно гибко (но заранее извест-

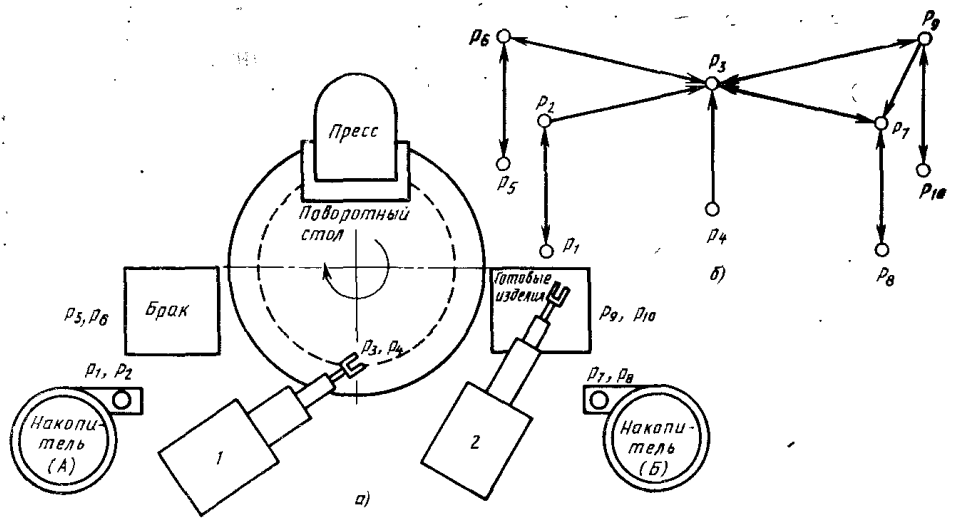


Рис. 5.19. Адаптивный робототехнический комплекс:
а — состав; *б* — пример задания

ным образом) перестраиваться в зависимости от состояния внешней среды.

Если передаваемые системой очувствления данные относятся ко второму типу, то адаптивное поведение робота, оснащенного датчиками такого рода, реализуется на уровне вычисления управления, т. е. на более низком уровне иерархии, чем логический уровень. В этом случае строятся законы управления, в которые соответствующие показания датчиков входят как параметры, т. е. адаптация не затрагивает верхних уровней системы управления, а является скорее параметрической.

Пример. Допустим, что адаптивный робототехнический комлекс (РТК) включает два манипулятора, СТЗ, работающую в режиме визуальной инспекции, поворотный стол и пресс (рис. 5.19, *а*). Задача, выполняемая РТК, — сборка узла, состоящего из двух деталей, которые находятся в накопителях. В общих чертах технологический процесс заключается в выполнении последовательности следующих операций.

Шаг 1. Взять деталь *А* из накопителя и перенести ее на сборочную позицию.

Шаг 2. Убедиться с помощью СТЗ в том, что деталь *А* действительно находится на сборочной позиции в требуемом положении. В противном случае перейти на шаг 11.

Шаг 3. Взять деталь *Б* из накопителя и перенести ее на сборочную позицию.

Шаг 4. Убедиться с помощью СТЗ в том, что деталь *Б* действительно находится на сборочной позиции в требуемом положении. В противном случае перейти на шаг 13.

Шаг 5. Повернуть стол.

Шаг 6. Запрессовать детали *А* и *Б*.

Шаг 7. Повернуть стол.

Шаг 8. Убедиться с помощью СТЗ, что узел собран верно. В противном случае перейти на шаг 15.

Шаг 9. Перенести узел в тару готовых изделий.

Шаг 10. Перейти на шаг 1.

Шаг 11. Взять деталь *А* и положить в тару брака.

Шаг 12. Перейти на шаг 1.

Шаг 13. Взять детали *Б* и *А* и положить в тару брака.

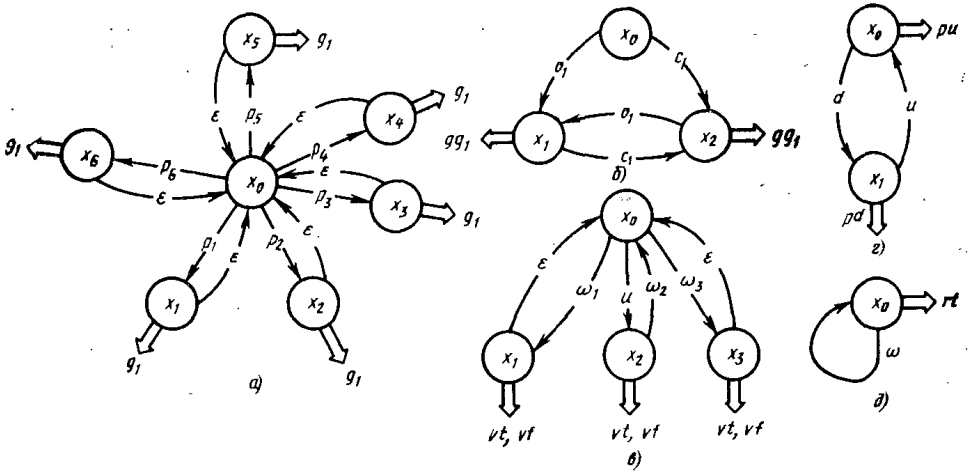


Рис. 5.20. Конечные автоматы, эквивалентные активным элементам, входящим в состав РТК

Шаг 14. Перейти на шаг 1.

Шаг 15. Взять узел и положить в тару брака.

Шаг 16. Перейти на шаг 1.

Наличие системы очувствления в виде СТЗ придает РТК адаптивные свойства, которые заключаются в смене линии поведения в зависимости от состояния процесса сборки, которое СТЗ контролирует.

Приведенная выше последовательность операций не отражает всей специфики сборочного процесса: в реальных условиях может появиться большое количество дополнительного оборудования, например, сборочные приспособления, различные ориентирующие устройства и т. д. Однако здесь присутствует большая часть типичных элементов для технологического процесса.

Ниже приведены описания активных элементов и их входной и выходной алфавиты (в скобках указаны имена соответствующих автоматов).

Манипулятор *1* (A_1). *Входной алфавит:* p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6. Появление на входе автомата этих символов обеспечивает перевод захвата манипулятора в соответствующую точку (рис. 5.19, *б*). *Выходной алфавит*: g_1. Этот символ свидетельствует о достижении захватом перечисленных выше точек. На рис. 5.20, *а* приведен граф переходов рассмотренного автомата.

Захват *1* (GR_1). *Входной алфавит*: o_1, c_1. Каждый из этих символов обеспечивает открытие и закрытие захвата. *Выходной алфавит*: gg_1. Свидетельствует о том, что захват манипулятора перешел в требуемое состояние. Соответствующий граф приведен на рис. 5.20, *б*. Мы выделяем здесь состояние захвата из числа описателей точки позиционирования, куда он, как правило, входит. Это обусловлено тем, что часто геометрические параметры точек позиционирования совпадают, а состояния захвата в ней разные (так бывает, например, при выполнении роботом транспортных операций, когда движение в одном направлении осуществляется при закрытом захвате, а в противоположном — при открытом).

Манипулятор *2* (A_2) *Входной алфавит*: p_3, p_4, p_7, p_8, p_9, p_{10}. *Выходной алфавит*: g_2.

Некоторые элементы входных алфавитов A_1 и A_2 выбраны одинаковыми. Это сделано для простоты дальнейшего изложения: на самом деле одни не должны совпадать.

Смысл этих символов аналогичен символам входного и выходного алфавита манипулятора *1*. Граф переходов совпадает с графом, изображенным на рис. 5.20, *а*.

Захват *2* (GR_2). *Входной алфавит*: o_2, c_2. *Выходной алфавит*: gg_2.

Система обозначений и граф переходов аналогичны соответствующим компонентам захвата *1*.

СТЗ (V). *Входной алфавит*: w_1, w_2, w_3. Эти символы инициируют обзор рабочего пространства системой технического зрения с целью обнаружения в нем 1-й детали,

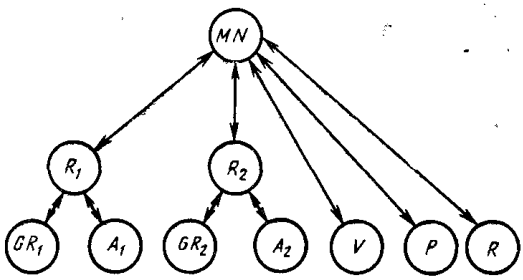


Рис. 5.21. Схема логической сети, управляющей поведением РТК

2-й детали и собранного узла соответственно. *Выходной алфавит*: *vt*, *vf*. Выходной сигнал *vt* свидетельствует о нормальном течении процесса сборки, а *vf* — об отклонении от нормы (деталь отсутствует в месте сборки или установлена неправильно). Граф конечного автомата V представлен на рис. 5.20, *в*.

Пресс (*P*). *Входной алфавит*: *u*, *d*. Символы входного алфавита обеспечивают перемещение подвижного элемента пресса вверх и вниз соответственно. *Выходной алфавит*: *pu*, *pd*. Появление на выходе этих символов свидетельствует о нахождении пуансона в требуемом положении. Граф конечного автомата P представлен на рис. 5.20, *г*.

Поворотный стол (*R*). *Входной алфавит*: ω. Появление символа ω приводит к тому, что стол повернется на одну позицию. *Выходной алфавит*: *rt*. Появление символа *rt* свидетельствует об окончании процесса поворота стола. Соответствующий граф приведен на рис. 5.20, *д*.

Таким образом, перечисленные выше конечные автоматы описывают поведение каждого из активных элементов адаптивного РТК. Построим управляющую структуру (логическую сеть) которая реализует адаптивный способ поведения сборочного РТК.

На рис. 5.21 приведена схема логической сети, компоненты которой являются конечными автоматами. Регуляторы R_1 и R_2 управляют манипуляторами и их захватами на основании полученной от них информации, а также команд монитора MN, который осуществляет согласованное управление всем комплексом в целом.

Опишем теперь кратко работу некоторых из автоматов, входящих в состав логической сети.

Регулятор (R_1). *Входной алфавит*: g_1, gg_1, st_1, ok_1, fl_1. Смысл символов g_1, gg_1 описан выше: они являются выходными символами автоматов A_1 и GR_1. Символы st_1, ok_1, fl_1 поступают на вход R_1 от монитора MN и означают следующее: st_1 — команда запуска регулятора; ok_1 — СТЗ подтвердила правильность протекания сборочного процесса; fl_1 — первый этап сборки завершен неудачно. *Выходной алфавит*: p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, ev_1. Символы p_1, ..., p_6 обеспечивают перевод манипулятора в соответствующие точки позиционирования (см. автомат A_1). Символ ev_1 передается монитору, чтобы проинформировать его о том, что, начиная с этого момента, можно инициировать работу СТЗ с целью проведения визуальной инспекции рабочей сцены, поскольку деталь A установлена в сборочное приспособление и поле зрения видеодатчика не заслонено захватом манипулятора.

На рис. 5.22, *а* представлен граф регулятора. Входной символ, получаемый в состоянии x_8, определяет поведение манипулятора: если деталь верно установлена в месте сборки, то цикл сборки продолжается, в противном случае манипулятор забирает деталь и укладывает ее в тару брака.

Монитор (*MN*). *Входной алфавит*: st_0, ev_1, *vt*, *vf*, ... Символ st_0 — это команда, источником которой является человек-оператор и который инициирует исполнение всего сборочного процесса. Все остальные символы принадлежат выходным алфавитам соответствующих автоматов. *Выходной алфавит*: st_1, w_1, st_2, ok_1, ω, ... Команды st_1 и st_2 запускают исполнение сборки первым и вторым манипуляторами. Заметим, что, попав в состояние x_4, монитор выдает сразу два управляющих символа, которые обеспечивают параллельное исполнение сборки двумя манипуляторами.

Фрагмент графа перехода монитора представлен на рис. 5.22, *б*. Монитор по существу управляет сборкой, обеспечивая запуск соответствующих активных элементов в зависимости от состояния сборочного процесса, т. е. придавая всему комплексу в целом адаптивные свойства.

Реализация логического управления. Способы реализации логического управления могут быть различными. Как известно, все

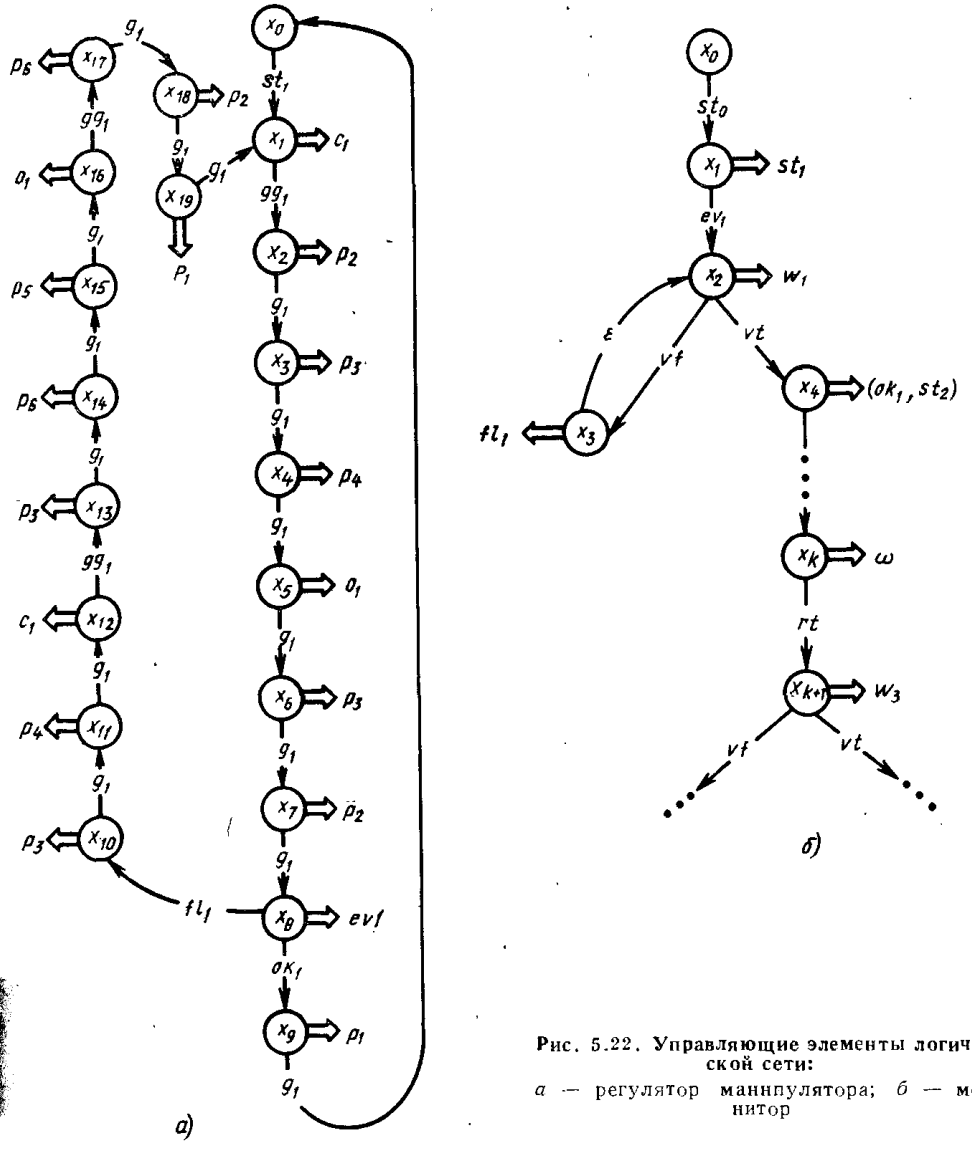


Рис. 5.22. Управляющие элементы логической сети:

а — регулятор манипулятора; *б* — монитор

уровни иерархии управления (возможно, исключая нижние) реализуются на базе ЭВМ, т. е. в виде некоторых программ. Логическое управление осуществляется сетью автоматов, которые обмениваются между собой элементами алфавитов. При этом естественно интерпретировать каждый автомат как процесс (или задачу), развитие которого определяется поступающими на его вход данными от других процессов. Конкретная реализация этих процессов зависит от мощности располагаемых вычислительных средств. Один из лучших способов реализации заключается в использовании мультимикропроцессорной сети, в которой каждый микропроцессор выполняет программно функции конечного автомата. В этом смысле использование теории конечных автоматов при разработке управления адап-

тивными роботами стимулирует распараллеливание процесса исполнения и является конструктивным. Для управляющих систем, имеющих небольшое число процессоров, необходимо реализовать мультизадаточный режим, что сопряжено с дополнительными расходами в связи с перераспределением ресурсов между задачами.

Вытекающая из теории конечных автоматов реализация конечного автомата в виде набора специальным образом соединенных простых логических элементов не является приемлемой для робототехнических систем, поскольку одним из отличительных качеств робота является его универсальность (т. е. возможность выполнять разнообразные операции), достигаемая путем его перепрограммирования. С точки зрения логического управления это означает перестройку связей, входящих в состав управляющей структуры автоматов, и тогда аппаратная реализация такой структуры (на базе логических элементов) теряет все свои преимущества.

Типичная программа [1], реализующая работу конечного автомата, представлена на рис. 5.23. Она написана на языке С и обеспечивает выполнение всех требуемых функций автомата, если соответствующим образом инициализирована структура данных (рис. 5.23, *а*). Программа является универсальной в том смысле, что обеспечивает программную реализацию почти всех автоматов (структура данных у каждого автомата инициализируется индивидуально); исключение составляют лишь некоторые автоматы, связанные непосредственно с активными элементами, т. е. автоматы нижнего уровня управляющей структуры (см. рис. 5.18), которые принимают информацию

```
/*-------------------------------------*/
/*-----------   STR.H   ---------------*/
/*-------------------------------------*/
STRUCT POINT
    {
    STRUCT POINT        *NEXT;
    STRUCT      _IN_
        {
        STRUCT  _IN_    *NEXT1;
        STRUCT  _OUT_
            {
            STRUCT      _OUT_   *NEXT2;
            LONG        INT     OUT_CH;
            INT         NOM_AT;
            }*TO_OUT;
    LONG        INT     IN_CH;
    INT         *PNT_NX;
    }*TO_IN;
  INT   STAT;
  INT   TIK;
  INT   NUMBER;
  };
/*-------------------------------------*/
STRUCT  BLOCK
    {
    INT         SIZE_B;
    INT         *PNT_FR;
    INT         *PNT_END;
    INT         BODY[ ];
    };
/*-------------------------------------*/
EXTERN  STRUCT  POINT   *DATA01[ ];
EXTERN  STRUCT  BLOCK   DATA02;
EXTERN  STRUCT  BLOCK   DATA03;
EXTERN  STRUCT  BLOCK   DATA04;
/*-------------------------------------*/
EXTERN  LONG    INT     DATA00[31];
EXTERN  INT     DATATM[31];
EXTERN  INT     DATAST[31];
/*-------------------------------------*/
#DEFINE GRPNUM  32
#DEFINE NULL    0
/*-------------------------------------*/
/*-------------------------------------*/
```

а)

[1] Автором программы является А. А. Дмитриев

Рис. 5.23. Программа, моделирующая работу конечного автомата:
а — структура данных; *б* — инструкции

```
/*-------------------------------------------------*/
#INCLUDE        "STR.H"
#DEFINE         NUM_SW          1
/*-------------------------------------------------*/
MAIN()
{
REGISTER STRUCT POINT   *A;
REGISTER STRUCT _IN_    *B;
REGISTER STRUCT _OUT_   *C;
INT      STATE;
/*-------------------------------------------------*/
A = DATA01[NUM_SW];
B = A->TO_IN;
FOR(;;)
  {
  WTSE( GRPNUM + NUM_SW);
  CLEF( GRPNUM + NUM_SW);
  IF(( STATE = REC_IN(B)) != NULL )
    {
    DATA00[NUM_SW] ^=  B->IN_CH;
    A = STATE;
    DATASTI[NUM_SW] = A->STAT;
    DATATMI[NUM_SW] = A->TIK;
    B = A->TO_IN;
    }
  }
}
/*-------------------------------------------------*/
REC_OUT(C)
REGISTER STRUCT _OUT_   *C;
{
REGISTER INT    *DEV;
REGISTER INT    BODY;

WHILE( C != NULL)
  {
  IF(C->NOM_AT < 0)
    {
    DEV = C->NOM_AT;
    BODY = C->OUT_CH;
/   *DEV = BODY;
    }
  ELSE
    {
    DATA00[ C->NOM_AT ] |= C->OUT_CH;
    SETF( C->NOM_AT + GRPNUM);
    }
  C = C->NEXT2;
  }
}
/*-------------------------------------------------*/
REC_IN(B)
REGISTER STRUCT _IN_    *B;
{

WHILE(  B->NEXT1 != 0)
  {
  IF(( DATA00[NUM_SW] & B->IN_CH) == B->IN_CH)
    {
    REC_OUT(B->TO_OUT);
    RETURN(B->PNT_NX);
    }
  }
RETURN(0);
}
/*-------------------------------------------------*/
```

б)

от регуляторов и соответствующим образом управляют активными элементами. Такое свойство программного обеспечения логического управления является чрезвычайно большим преимуществом конечно-автоматного подхода к управлению адаптивными робототехническими системами, поскольку позволяет строить логический уровень управления из однотипных, заранее разработанных модулей, оставляя программисту лишь задачу соответствующего заполнения структур данных, описывающих каждый автомат.

Таким образом, выше мы рассмотрели ряд вопросов, связанных с логическим управлением адаптивными робототехническими комплексами, касаясь при этом только формулировки основных идей, связанных с использованием аппарата теории конечных автоматов для решения этой проблемы. При этом не были затронуты очень важные вопросы: формальный анализ поведения адаптивного робототехнического комплекса; способ описания логической сети на языковом уровне; формальное доказательство правильности работы логической сети; формализация синтеза управляющих структур исходя из заданной цели и возможностей активных элементов.

Описанный в этом параграфе подход выполнен на неформальном уровне, хотя и в этом случае он позволяет получать некоторые результаты для несложных робототехнических систем.

5.4. Инструментальные средства для разработки и исследования алгоритмического и программного обеспечения адаптивных роботов

Программное обеспечение адаптивного робота — это одна из самых сложных и дорогостоящих его компонент. Она определяет уровень адаптации робота, способ его функционирования в недетерминированной среде, а также ту простоту и легкость, с которой человек-оператор может обращаться с роботом, формируя ему задания с одной стороны и получая от него информацию о состоянии робота и исполняемого им задания с другой стороны. Поэтому проектирование программного обеспечения адаптивного робота представляет собой трудоемкую процедуру, требующую не только больших интеллектуальных и временных затрат разработчика, но и соответствующих вычислительных средств, мощность которых (аппаратная и программная) должна, как правило, быть больше вычислительной мощности адаптивного робота. С этой целью используют инструментальные вычислительные комплексы, оснащенные не только широким набором периферийных устройств, но и развитыми операционными системами, как универсальными, так и проблемно-ориентированными.

Функции, которые выполняют эти инструментальные комплексы, разнообразны: исследование алгоритмов управления движением и методов обработки информации в робототехнических системах, имитационное моделирование различных подсистем робота (включая исполнительный механизм), подготовка данных для рабочих робототехнических комплексов и т. д.

Ниже описаны два инструментальных комплекса, их структура, а также рассмотрены решаемые ими задачи.

Исследовательский инструментальный робототехнический комплекс. Этот комплекс разработан в МВТУ им. Н. Э. Баумана. Программное обеспечение инструментального комплекса состоит из двух компонент — универсальных и проблемно-ориентированных средств.

Универсальные средства, включающие операционные системы (чаще всего — реального времени), являются базовыми для разработки программного обеспечения роботов. Для рассматриваемого инструментального комплекса такими операционными системами являются РАФОС (RT-11), ОС РВ (RSX-11M). Каждая из этих операционных систем предоставляет пользователю свои собственные средства для разработки программного обеспечения роботов. К указанным средствам относятся трансляторы (или интерпретаторы) с языков программирования, загрузчики, редакторы и т. д. Так, операционная система RSX-11M позволяет писать программы на следующих языках: Macro-11 (ассемблер), PL-11, PASCAL, FOCAL, BASIC, C, LISP, ФОРТРАН.

Проблемно-ориентированные средства строят на базе универсальных.

Специализированная операционная система, представляющая собой вторую компоненту программного обеспечения, выполняет следующие функции:

формирование программы движения (либо в процессе обучения робота, либо на разработанном проблемно-ориентированном языке);

исполнение программы движения (либо ее имитация);

тестирование каналов связи ЭВМ — манипулятор — ЭВМ;

калибровка телевизионной камеры;

исследование алгоритмов управления и обработки информации;

подготовка и передача данных на рабочий робототехнический комплекс.

Программное обеспечение робота представляет собой набор модулей, которые можно рассматривать и проектировать как проблемно-ориентированную операционную систему. Действительно, те задачи, которые решает программное обеспечение робота, во многом совпадают с задачами, решаемыми универсальными операционными системами. Это совпадение касается, в частности, необходимости распределять ресурсы управляющей ЭВМ, обеспечивать мультизадачный режим работы, поддерживать принятую структуру данных, осуществлять операции ввода/вывода, предоставлять человеку-оператору возможность формировать программу движения манипулятора на проблемно-ориентированном языке и т. д. Все эти атрибуты присущи как программному обеспечению роботов, так и универсальным операционным системам.

На рис. 5.24 приведена структура программного обеспечения робота, которая в общих чертах совпадает со структурой операционной системы. Это обстоятельство дает возможность при разработке программного обеспечения воспользоваться результатами, получен-

Рис. 5.24. Структура проблемно-ориентированной операционной системы

ными в области системного программирования, и, в частности, конечным продуктом — универсальными операционными системами как ядром программного обеспечения роботов.

Человек-оператор общается с системой с помощью программы интерактивного монитора, который обеспечивает прием и адекватное накопление, исполнение директив оператора. Выбор команд монитора определяется теми задачами по управлению и обучению робота, которые стоят перед человеком-оператором. В приведенном ниже примере подсказки и сообщения системы выделены подчеркиванием.

1. PROGRAM — *переход в режим запоминаемой программы; формирование программы управления* МР *на проблемно-ориентированном языке.*

Формат команды:

PROGRAM
input SOS—file=[⟨имя—входного—текстового—файла⟩]
output SOS—file=[⟨имя—выходного—текстового—файла⟩]
output run—file=[⟨имя—задачи⟩]
options=[DB] [IM] [EX]

Программа управления движением МР, формируемая в режиме PROGRAM, представляет собой последовательность операторов языка, среди которых могут быть следующие операторы: элементарных перемещений исполнительного механизма, реализующие некоторые вычислительные процедуры, управляющие ходом исполнения рабочей программы, и другие. Команда PROGRAM помимо формирования программы предоставляет пользователю и некоторые

возможности отладки. В зависимости от указанных ключей сформированная программа может быть исполнена либо полностью (ключ EX), либо в пошаговом режиме (DB) с выдачей на каждом шаге информации о состоянии исполнительного механизма. Программа движения может формироваться, обслуживаться и исполняться как с участием реального механизма, так и с использованием его кинематической модели, выводимой на экран графического дисплея.

2. EDIT — *команда редактирования; позволяет либо отредактировать уже существующий текстовой файл, либо создать новый на внешнем запоминающем устройстве.*

Формат команды:

EDIT
input SOS—file=[⟨имя—входного—текстового—файла⟩]
output SOS—file=[⟨имя—выходного—текстового—файла⟩]

Для использования программ, подготовленных с помощью редактора, их необходимо передать на вход транслятора с языка управления движением, который выполнит соответствующие преобразования и сформирует загрузочный модуль.

3. RUN — *команда исполнения программы, подготовленной в режиме* PROGRAM.

Формат команды:

RUN
task name= имя—задачи

В зависимости от того, с каким ключом формировался загрузочный модуль в режиме PROGRAM, команда RUN выполнит пошаговую обработку программы с выдачей информации о состоянии исполнительного механизма по завершении очередной инструкции соответствующего текста или исполнит всю программу с выдачей управления либо на реальный исполнительный механизм, либо на его модель на экране графического дисплея.

4. TRAIN — *переход в режим обучения* (*режим запоминаемых данных*).

Формат команды:

TRAIN
input data name=[⟨имя—входных—данных⟩]
output data name=[⟨имя—выходных—данных⟩]
default: [T=⟨число⟩] [V=⟨число⟩]
options [IM] [SN]
TRN⟩ ⟨?⟩|⟨TYPE⟩|⟨OFF⟩|⟨ON⟩|⟨EXT⟩

Команда является многофункциональной и предоставляет человеку-оператору следующие возможности:

формировать и редактировать программу движения в диалоговом режиме (без выдачи управления на исполнительный механизм) (OFF-режим);

формировать и редактировать программу движения, используя задающие органы — функциональный пульт, клавиатуру терминала или подобный исполнительному задающий механизм (ON-режим);

исполнять сформированную программу с выдачей управляющих сигналов непосредственно на приводы исполнительного механизма, либо имитировать исполнение программы с помощью графического дисплея (режим EXT);

получать данные для использования на промышленном робототехническом комплексе (режим COPY);

запросить информацию о возможностях, представленных системой пользователю — (режим ?).

5. EXEC — *исполнение траектории движения, сформированной в режиме* TRAIN.

Формат команды:

EXEC

data name=⟨имя—данных⟩

option=[AT] [ST]

point=⟨номер—точки—в—массиве—последовательности⟩

Программа может отрабатываться как в автоматическом (ключ AT), так и в пошаговом режиме (ключ ST) с первой или любой другой позиции последовательности узловых точек траектории.

6. TEST — *тестирование каналов связи ЭВМ—МР и МР—ЭВМ и калибровка телевизионной системы.*

Формат команды:

TEST

device=[TV] [ARM]

Тестирование каналов связи (режим ARM) выполняется посредством активного эксперимента, в результате чего определяются параметры системы, значения которых могут меняться при изменении внешних условий. В соответствии с полученными параметрами осуществляется автоматическая подстройка программного обеспечения системы, связанного с обслуживанием внешних устройств.

При работе с телевизионной системой необходимо иметь «привязку» систем координат камеры и рабочего пространства. Она выполняется автоматически по запросу пользователя (TV), и результаты калибровки «рассылаются» по соответствующим программам, связанным с системой визуальной информации.

Таким образом, набор рассмотренных основных команд специализированной системы удовлетворяет большинству потребностей пользователя инструментального робототехнического комплекса по подготовке и исполнению программ управления.

Одним из способов задания движения робота в не полностью предсказуемой обстановке является не только описание точек позиционирования с указанием порядка их обхода, но и указание условий, при которых осуществляется переход от одной точки к другой, а также выполнение некоторых дополнительных операций. Реализация такого способа задания движения — это использование проблемно-ориентированного языка, в число основных конструкций которого входят как операторы, обеспечивающие непосредственное управление движением, так и операторы, позволяющие обрабаты-

вать сенсорную информацию и на основании результатов обработки управлять процессом прохождения программы.

Основные конструкции входного проблемно-ориентированного языка управления движением манипулятора могут быть описаны следующим образом.

Формат строки. Программа управления представляет собой последовательность операторов, каждый из которых может быть снабжен меткой. Форматирование строки совпадает в основном с форматированием, используемым в языке ФОРТРАН, с той лишь разницей, что в первой позиции строки допускается наличие буквы F. Это означает, что строка представляет собой оператор, написанный на языке ФОРТРАН. Эта возможность предоставляется пользователю для того, чтобы сформировать некоторые специфические законы управления движением или отработки информации.

Операторы входного языка. Их делят на исполняемые и неисполняемые. Исполняемые операторы приводят либо к некоторому перемещению манипулятора, либо к подготовке этого перемещения путем инициирования датчиков считывания и обработки соответствующей информации. Неисполняемые операторы информируют транслятор о некоторых особенностях вводимой программы и не порождают никаких действий со стороны манипулятора и датчиков.

Любое движение исполнительного механизма можно представить как совокупность некоторых элементарных движений. Поэтому целесообразно иметь набор операторов, которые будучи сгруппированы в различных комбинациях, могут обеспечить любое сколь угодно сложное движение. Такие операторы называются элементарными. Однако крайне неудобно использовать для задания программы движения этот ограниченный набор элементарных операторов. Поэтому пользователю предоставляется возможность применять операторы, которые не являются элементарными, но могут быть к ним сведены. Такие операторы называют макрооператорами или макросами.

Положение манипуляторов может быть задано одним из следующих способов:

с помощью вектора, компоненты которого представляют собой либо углы в подвижных сочленениях

$$\mathbf{q} = (q_1,\ q_2,\ q_3,\ q_4,\ q_5,\ q_6)^{\mathrm{T}},$$

либо координаты захвата

$$\mathbf{s} = (x,\ y,\ z,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma)^{\mathrm{T}};$$

с помощью матрицы следующей структуры:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{x_6} & \mathbf{e}_{y_6} & \mathbf{e}_{z_6} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $\mathbf{e}_{x_6}$, $\mathbf{e}_{y_6}$, $\mathbf{e}_{z_6}$ — векторы, имеющие в качестве проекции направляющие косинусы, которые связывают абсолютную систему координат $X_0Y_0Z_0$ и систему координат захвата $X_6Y_6Z_6$ (рис. 5.25); $\mathbf{p}$ — вектор, связывающий начало абсолютной системы координат с началом системы координат захвата.

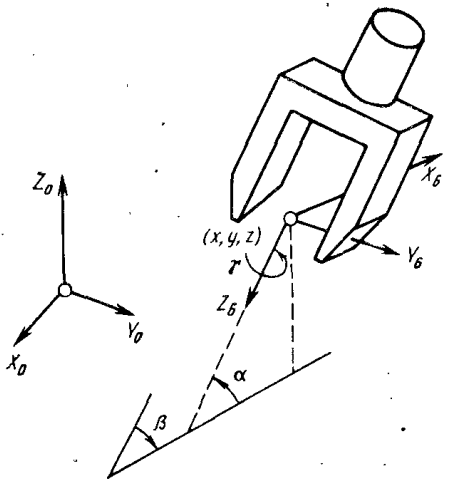


Рис. 5.25. Система координат захвата и ее связь с абсолютной системой координат

Все элементарные операторы можно разбить на следующие группы:

операторы движения [Д];

операторы ввода-вывода [В];

арифметические операторы [А];

операторы передачи управления [У];

операторы управления трансляцией [Т];

операторы модификации текста [М];

неисполняемые операторы [О];

операторы управления внешним оборудованием [С].

Для описания некоторых из введенных в состав языка элементарных операторов и их семантики принята следующая система обозначений: числа обозначены маленькими буквами, имена (идентификаторы) — большими буквами, в квадратных скобках после имени оператора указана его группа.

Ниже приведены основные операторы языка.

1. PQ (j, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) [Д]

Оператор обеспечивает выдачу на приводы исполнительного механизма управляющих сигналов

$$q_i^g = q_i + jq_i^a, \quad i = 1, 2, \ldots, 6.$$

где q_i^g — управляющий сигнал на i-ю степень; q_i^a — текущее состояние i-й степени подвижности;

$$j = \begin{cases} 1, & \text{относительное задание управляющих углов;} \\ 0, & \text{абсолютное задание управляющих углов.} \end{cases}$$

2. IPQ (j, A) [Д]

Оператор эквивалентен предыдущему, с той лишь разницей, что управляющие углы задаются не явно, как в операторе PQ ( ), а составляют содержимое массива A:

$$A(i) = q_i, \quad i = 1, 2, \ldots, 6.$$

Здесь A — это имя массива.

3. PQM (j, m, q) [Д]

В результате реализации этого оператора на m-й привод выдается управляющий сигнал $q_m^j = q + jq_m^a$. Здесь j и q_m^a имеют тот же смысл, что и для оператора PQ ( ). Заметим, что по результирующему движению манипулятора оператор PQ (j, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) эквивалентен следующей последовательности операторов:

PQM (j, 1, q_1)

PQM (j, 2, q_2)

PQM (j, 3, q_3)

. . . . . .

PQM (j, 6, q_6)

Траектория перехода в целевую точку будет в этом случае отличаться от траектории, реализуемой оператором PQ ( ).

4. PSQ (S, Q) [A]

Оператор обеспечивает решение обратной кинематической задачи, преобразуя входной массив $S = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ в выходной массив $Q = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$.

5. QST (Q, T) [A]

Оператор решает прямую кинематическую задачу. Выходом является массив T, характеризующий состояние захвата.

6. DEV (a) [B]

Оператор считывает текстовый файл с именем «а» с внешнего устройства и добавляет его к первоначальному файлу.

7. JUMP (l) [У]

Оператор осуществляет безусловную передачу управления на метку l.

8. GOIF (A, e, C, l) [У]

Оператор осуществляет условное ветвление на метку l, при этом проверяемое условие состоит в том, что логическое выражение AeC принимают значения «истина», где e — одно из отношений EQ, GE, LE, GT, LT

9. GOIM (α, l) [У]

Обычно все условные операторы языков программирования связаны с многократной проверкой контролируемых предусловий или постусловий. Отличительной чертой этого оператора является постоянное слежение за состоянием указанного канала α. В том случае, когда в этом канале возникает сигнал, управление передается на метку l.

10. TV (pi, N, $X0$, $Y0$, FI) [B]

Оператор осуществляет ввод и обработку видеоинформации, поступающей с системы технического зрения. Входящие в состав оператора параметры имеют следующий смысл: pi — характеризует наличие или отсутствие искомых объектов; N — число обнаруженных объектов; $X0$, $Y0$, FI — координаты центров тяжести и ориентация найденных объектов.

С помощью набора элементарных операторов может быть реализовано практически любое движение манипулятора. Однако для обеспечения удобства работы с исполнительным механизмом целесообразно укрупнить эти операторы, создав макрооператоры (макросы), которые предоставили бы пользователю широкие возможности по управлению манипуляционными роботами на уровне сложных движений захвата.

Разработанный подход заключается в использовании макропроцессора, который, встретив во входном тексте макрооператор, заменяет его (в соответствии с имеющейся библиотекой макрорасширений) на текст на входном языке управления; далее этот текст поступает на вход транслятора.

Рассмотрим примеры макрооператоров, сопровождая их описание заменяющим текстом. Заметим, что именам, генерируемым самим макропроцессором, предшествует символ «#».

1. OP, CL

Оператор приводит к открытию (закрытию) захвата. Макрорасширения имеют следующий вид:

OP = PQM (0, 7, 0) CL = PQM (0, 7, 1)
WAIT (3) WAIT (3)

2. PNT (T)

Оператор обеспечивает перевод захвата в положение, характеризуемое массивом T. Макрос имеет следующее расширение:

PNT (T) = TR (T, #S); преобразование T в #S = $(x, y, z, \alpha, \beta, j)^T$
PSQ (#S, #Q); решение обратной кинематической задачи
IPQ (0, #Q); выдача управляющих сигналов.

Приведенные примеры в достаточной степени иллюстрируют способ применения аппарата макросов. Так, если допустить вложенность, т. е. наличие макросов в макрорасширении, то этот аппарат становится мощным средством задания сколь угодно сложных движений манипулятора, обеспечивая в некоторых случаях даже поведенческие функции.

Многоцелевой инструментальный комплекс. Примером многоцелевой инструментальной системы для моделирования и макетирования роботов может служить аппаратно-программный комплекс ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР.

Развитое системное программное обеспечение задач робототехники разработано на базе БЭСМ-6, SDS-910, а также мини-ЭВМ М-6000 и подключенных к ней каналов связи мини-ЭВМ М-7000 и микроЭВМ «Электроника-60». Мини-ЭВМ М-7000 расширяет вычислительные мощности, когда ресурсов М-6000 не хватает, а подсистема М-6000 — «Электроника-60» используется для подготовки и отладки программ для микроЭВМ «Электроника-60».

Для более удобного использования в адаптивных роботах в дисковой операционной системе ДОС М-6000 заменена супервизорная часть и большинство обрабатывающих программ (редактор, компоновщик и т. д.), упрощена файловая система — все программы (системные и пользовательские) хранятся в одной и той же области диска, причем программы пользователя имеют доступ ко всему диску. Отказ от прерываний (работа по опросу готовностей) позволил значительно упростить супервизорную часть операционной системы и сделал ее независимой от операций с системой прерываний программ пользователя при работе с робототехническими устройствами. Существенно облегчилось написание таких программ.

Для повышения производительности комплекса разработан ориентированный на структурное программирование язык высокого уровня МЭЛ, допускающий вставки на ассемблере. Транслятор с этого языка реализован в нескольких версиях — для М-6000, «Электроники-60», СМ-2 и т. д. Сам транслятор также написан на языке МЭЛ, что сильно упрощает его адаптацию к различным ЭВМ. Проведенные исследования показали что по сравнению со стандартным ФОРТРАНом язык МЭЛ дает следующий выигрыш — новый текст составляет 55 %, а программа (объектный модуль) — 45 % старого.

В языке МЭЛ имеются два типа данных — простая переменная и массив. В них могут храниться целые числа, восьмеричные константы, буквенно-цифровые символы и адреса. На уровень элементарных операций вынесены логические операции, сдвиги, операции с адресами. Число исполнительных операторов минимально: присвоение, вызов программы, простейший цикл, безусловная передача управления и условный оператор. Основные преимущества языка заключаются в богатом наборе логических операций и операций манипулирования битами, в свободном употреблении арифметических и логических выражений и в простом по организации, но мощном условном операторе. Нередки случаи, когда программа состоит практически из одного разветвленного оператора. Особо следует отметить, что в вставках на ассемблере могут быть использованы объекты (переменные метки), определенные в языковой части программы, и наоборот.

Разработана специальная система программирования для микроЭВМ «Электроника-60», базирующаяся на мини-ЭВМ М-6000. В систему входит программный эмулятор архитектуры ЭВМ «Электроника-60», позволяющий выполнять в рамках ДОС М-6000 программы перфоленточной операционной системы ЭВМ «Электроника-60» (транслятор с ассемблера и компоновщик). При этом перфолента заменяется файлами на диске М-6000 и появляется возможность использования средств местного редактора тестов и библиотек.

Разработано математическое обеспечение дисплейной станции SDS-910, сопряженной с ЭВМ БЭСМ-6. Подключение графического дисплея к большой ЭВМ через малую машину-сателлит позволяет минимизировать время ответа системы на некоторые действия пользователя за пультом дисплея, делает возможным использование дисплея, удаленного от основной ЭВМ, а также снимает с нее рутинную работу по регенерации изображений на экране дисплея. Для увеличения производительности дисплейной системы предусмотрена буферизация информации, поступающей от БЭСМ-6 и от внешних устройств, и очереди запросов на операции с устройствами. Информация, передаваемая в БЭСМ-6, приводится к виду, готовому для использования программой, написанной на ФОРТРАНе.

Разработаны средства трехмерной машинной графики для исследования различных робототехнических систем и для создания машинных фильмов. Система отличается достаточно высоким быстро-

действием при построении пространственной среды робота и произвольно ориентированных объектов с удалением невидимых линий. Имеется также возможность деформации линейной перспективы с целью улучшения восприятия человеком дисплейных изображений.

В комплекс моделирования и макетирования робототехнических устройств на основе мини-ЭВМ М-6000 включены дополнительные терминалы — устройства ввода с перфокарт УВВК-601, алфавитно-цифровые дисплеи «Видеотон-340» и «Видеотон» ЕС 7168, АЦПУ «Видеотон-343» или ЕС 7184, графопостроители рулонного типа «CALCOMP-565». Для этих устройств разработан полный набор драйверов, ядром системы которых являются драйверы дисплеев «Видеотон». Во всех системах математического обеспечения они позволяют в диалоговом режиме управлять переключением ввода-вывода требуемых устройств. В целом была обеспечена гибкость систем ввода-вывода М-6000.

В различных задачах робототехники — при управлении движением колесных и шагающих роботов, на сборке с помощью манипуляторов — требуется организация работы на управляющей ЭВМ с последовательными процессами в режиме реального времени. Разработанная система управления процессами, в частности, позволяет описывать логику запусков процессов на ФОРТРАНе, а также по указанию пользователей «размножать» при необходимости в процессе компоновки модуля любые программы и функции, в том числе стандартные.

Примером созданного математического обеспечения может служить организация процессов в системе управления подвижного робота в виде монитора. Отдельные процессы представляют цифровую следящую систему, систему сбора информации от СТЗ и датчиков положения, систему планирования движения и т. п.

Основой монитора является шкала уровней, которая представляет собой массив из N ячеек (ТАБ) и «стрелку» (СТР), показывающую заполненность шкалы. В массиве ТАБ справа налево запоминаются имена (номера) программ системы управления движением, к которым должен обратиться монитор. Программа-монитор последовательно передает управление уровням или программам, номера которых содержатся в шкале, начиная с уровня, на который указывает стрелка. Если число СТР равно N, т. е. указанный уровень последний, то монитор системы построения движения заносит в специальную таблицу время следующего включения системы и передает управление общему монитору.

В процессе работы каждый уровень вырабатывает признак окончания работы. Фактически это выражается в занесении в некоторую специальную ячейку с именем СИТУАЦИЯ некоторого числа. В зависимости от этого монитор формирует шкалу уровней.

Как показали эксперименты, мониторная организация управления робота обеспечивает гибкость и высокую адаптивность системы.

Глава 6

АДАПТИВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

6.1. Особенности сварочных роботов

В современном производстве дуговая сварка занимает одно из ведущих мест. В ряде отраслей, например, в судостроении, этот метод соединения является наиболее производительным, а часто и единственно возможным. Поэтому автоматизация процессов дуговой сварки имеет большое народнохозяйственное значение.

Автоматизированные установки для дуговой сварки, используемые в настоящее время, как правило, могут выполнять швы относительно простой конфигурации. Автоматизация процесса дуговой сварки при сложной линии соединения, тем более при значительной номенклатуре изделий, с помощью обычных сварочных автоматизированных установок либо вообще невозможна, либо не дает удовлетворительных практических результатов.

Применение промышленных роботов, кинематика которых обеспечивает выполнение рабочим органом сложных пространственных движений, позволило резко расширить границы автоматизации процессов дуговой сварки и в значительной мере приступить к комплексной автоматизации сварочного производства.

Принципиальным отличием сварочных роботов от роботов других типов является необходимость обеспечения движения их рабочего органа (горелки) по линии сварного шва с заданной пространственной точностью при определенной скорости движения и ориентации горелки. Причем, если последний параметр не столь критичен, то требования к допустимым отклонениям от заданной траектории точки сварки и от заданной скорости перемещения этой точки довольно жесткие. Для большинства объектов, свариваемых в защитных газах, отклонение электрода от линии шва обычно допускается в пределах $\pm(0{,}5 \div 1{,}0)$ мм, а погрешность по скорости не должна превышать ± 5 %. При этом необходимо учесть, что диапазон скорости сварки 2—20 мм/с, что вместе с требованием обеспечения быстрых перемещений (без сварки) предъявляет серьезные требования к системе управления и к приводу манипулятора.

Другой особенностью робота для дуговой сварки является острая необходимость максимального упрощения и автоматизации процесса обучения робота оператором. Это объясняется тем, что удовлетворение отмеченных выше требований, с одной стороны, и выбор сварочных роботов как средства автоматизации дуговой сварки пространственных швов сложной конфигурации при многономенклатурном производстве, с другой стороны, обусловливают такое частое распо-

ложение промежуточных точек позицирования, что сам процесс обучения робота способом последовательного прохождения через эти точки траектории недопустимо растягивается во времени и для самых простых швов может занимать 20—30 мин, а для сложных; до — одной рабочей смены. Кроме того, такой способ влечет за собой непомерное увеличение объема памяти системы управления роботом.

Из сказанного следует, что обычные позиционные системы управления непригодны для ПР, используемых при дуговой сварке. Развитие роботов этого типа потребовало разработки контурных систем управления, которые позволяют выполнять обучение ПР по характерным точкам траектории, в которых линия соединения изменяется, например, прямая линия шва претерпевает излом, переходит в дугу или наоборот, либо дуга одного радиуса сменяется дугой иной кривизны и т. п. Контурная система управления сварочных роботов, в память которой при обучении заносятся характерные точки траектории и указание о виде траектории между ними (прямая, дуга, окружность), автоматически рассчитывает положение промежуточных точек, «расставляя» их с шагом, который зависит от необходимой точности и скорости перемещений, т. е. система управления решает интерполяционную задачу (линейную или круговую). Как известно, прямая в пространстве может быть задана двумя точками, а дуга окружности — тремя. Современные контурные системы управления сварочных роботов позволяют во много раз ускорить и значительно упростить весь процесс обучения.

Следующей ступенью автоматизации обучения сварочных роботов является внешнее программирование, при котором характерные точки задаются в координатах изделия с чертежа. Естественно, в этом случае координаты характерных точек задаются в декартовой системе координат. Для обеспечения манипулятора в заданную таким образом точку необходимо автоматическое преобразование декартовых координат в координаты степеней подвижности манипулятора, т. е. решение так называемой обратной кинематической задачи. Эти преобразования также должны выполняться в системе управления робота.

Весьма перспективным вариантом внешнего программирования роботов для сварки является обучение в интерактивном режиме с «проигрыванием» движений сварочной горелки и изделия на экране дисплея без активации манипуляционной системы.

Внешнее программирование увеличивает степень использования технологического оборудования, уменьшает влияние субъективных факторов оператора в программе и повышает безопасность обслуживания роботов.

Уже из перечисленных выше функций обработки информации (сюда следует добавить также решение компарационной задачи следящего привода, присущей всем роботам), необходимых для обеспечения управления сварочными роботами, становится очевидным, что решить эту задачу могут только ЭВМ или близкие к ним по арифметико-логическим ресурсам вычислительные средства. К вы-

числительным средствам систем управления сварочных роботов предъявляются весьма жесткие эксплуатационные требования, в частности, по компактности, надежности и ремонтопригодности. Для сварочных роботов вопросы надежности особенно важны, поскольку в этом случае роботы выполняют основную технологическую операцию (а не вспомогательную) и непосредственно влияют на качество изделия. При этом стоимость системы управления робота не должна быть слишком высокой.

В полной мере удовлетворить таким требованиям стало возможным только на основе использования современной микропроцессорной техники. Именно по этой причине серийные сварочные роботы появились относительно недавно — вместе с надежными и недорогими микропроцессорными вычислительными средствами.

Обеспечить доступ горелки робота ко всем швам большинства сварных изделий при их неподвижности не всегда оказывается возможным, либо для этого требуется манипулятор с большим числом степеней подвижности, следовательно, сложный в управлении и изготовлении. Наиболее простым решением этой проблемы явилось включение в состав сварочного РТК второго манипулятора — для изделия. Кроме синхронно-согласованного перемещения изделия в процессе сварки, этот манипулятор позволяет либо целиком, либо большую часть сварки производить в наиболее удобном положении, близком к нижнему, когда обеспечивается наилучшее формирование сварного шва (с учетом действия сил тяжести). Манипулятор изделия управляется от той же системы управления, что и манипулятор горелки.

Другой особенностью роботизированной дуговой сварки является требование управления сварочным током (скоростью подачи электрода), напряжением дуги и скоростью сварки в зависимости от толщины свариваемых элементов, пространственного положения шва, зазора между свариваемыми элементами, и других особенностей объектов сварки. В современных сварочных РТК указанными параметрами сварочного процесса также управляет система управления роботов. Эта система кроме того обеспечивает колебания горелки при ее движении вдоль шва с заданной амплитудой и частотой.

При сварке крупногабаритных изделий очень часто допуски на размеры заготовок бывают достаточно большими, по крайней мере значительно больше, чем допустимая погрешность отклонения горелки от линии соединения свариваемых элементов. Например, фактические отклонения размеров элементов ковша мощного погрузчика, соединяемых дуговой сваркой, могут доходить до ± 5 мм, в то время как погрешность наведения электрода на линию соединения не должна превышать 1,0—1,2 мм. Это означает, что для сварки каждого очередного экземпляра одного и того же изделия робот с программным управлением должен быть заново обучен оператором. Такой подход для большинства производственных задач неприемлем. Одним из путей решения этой проблемы является оснащение роботов специальными системами восприятия изменений окружающей производственной среды (в качестве основного эле-

мента которой выступает само изделие), т. е. создание адаптивных роботов.

В настоящее время известно несколько типов систем адаптации для сварочных роботов, воспринимающих отклонения геометрии свариваемого экземпляра изделия от «эталонного» (им становится тот экземпляр, на котором проводилось первое обучение робота оператором) и передающих эту информацию в систему управления робота. Система управления осуществляет соответствующую коррекцию хранящейся в ее памяти программы движения горелки. В принципе возможна адаптация и к совершенно новому изделию в пределах определенного класса, но ее реализация на существующих вычислительных средствах пока еще слишком громоздка и дорога.

Реализованные в настоящее время системы адаптации сварочных роботов прежде всего отличаются друг от друга своими воспринимающими устройствами — датчиками, в значительной степени определяющими особенности самой системы адаптации.

Одной из первых практически использованных систем адаптации роботов для дуговой сварки является система фирмы «Хитачи» (Япония), построенная на основе двух магнитных датчиков, которая позволяет корректировать движения робота вдоль шва углового таврового соединения. Преимущество данной системы адаптации — ее простота и возможность работы в процессе сварки, а не только при предварительном корректирующем проходе без сварки. Основным недостатком этой системы является невозможность адаптации при сварке на закруглениях малого радиуса.

6.2. Методы адаптации промышленных роботов для дуговой сварки

Как показывает практика, широкая роботизация сварочного производства в значительной степени зависит от наличия надежных средств адаптации, пригодных для использования в составе РТК дуговой сварки.

Случайные отклонения линии сопряжения свариваемых деталей от траектории, запрограммированной роботу, вызывают необходимость геометрической (пространственной) адаптации, в результате чего система управления корректирует траекторию перемещения сварочной горелки относительно изделия. Отклонения геометрических характеристик (зазора, площади сечения разделки, взаимного положения кромок свариваемых элементов и т. д.) самого соединения, подготовленного под сварку, вызывают необходимость технологической адаптации, при которой должны корректироваться параметры процесса сварки (сила сварочного тока, напряжение дуги, скорость сварки, амплитуда и частота колебаний электрода и т. д.).

Целесообразно различать два класса задач геометрической адаптации: 1) отклонение линии соединения свариваемых элементов от заданного положения не сопровождается искажением формы

этой линии; 2) отклонение линии соединения от расчетного положения сопровождается изменениями ее формы.

Рассмотрим вначале первый класс задач, для которых отклонения линии соединения могут быть сведены к ее параллельному переносу или повороту в рабочем пространстве. Принцип адаптации, который может быть использован для решения задач этого класса, основан на том, что при неизменной форме линии соединения для получения информации о необходимой корректировке программы перемещений для данного экземпляра изделия достаточно найти до начала сварки (с помощью какого-либо датчика) положение определенного числа базовых точек на тех поверхностях свариваемых элементов, пересечения которых образуют линию соединения или отстоят от нее на неизменном расстоянии. Датчик можно рассматривать как тактильный прибор или устройство другой физической природы, например, датчик расстояния до поверхности изделия. Для нахождения положения базовой точки датчику сообщается заранее «обученное» поисковое движение в направлении к поверхности изделия. Базовая точка здесь определяется как точка пересечения линии поиска с поверхностью изделия. Ориентация линий поиска в рабочей зоне остается неизменной для всех экземпляров изделия данного типоразмера.

Для определения положения тела в пространстве в общем случае необходимо и достаточно найти положения трех непараллельных между собой плоскостей, принадлежащих этому телу. Каждая плоскость задается положением трех базовых точек, не лежащих на одной прямой. В результате получается девять базовых точек.

В универсальном РТК дуговой сварки поиск всех базовых точек должен производиться последовательно до начала сварки, что требует значительных затрат времени. Поэтому весьма важно для конкретных типовых задач находить возможности уменьшения числа корректируемых базовых точек. Например, в тех случаях, когда все швы прилегают к одному элементу неизменной формы, случайным образом смещенному в пространстве, фактическое положение всех точек этого элемента можно определить по шести базовым точкам, так как при малых смещениях положения остальных трех точек можно вычислить, если известны координаты указанных шести точек. Если задача может быть сведена к повороту в стационарной плоскости, например, при приварке случайно смещенного жесткого элемента любой формы к плоскому листу, не изменяющему своего положения в пространстве, то достаточно определить смещения трех базовых точек.

Неизменность формы линии соединения при ее случайных смещениях характерна для сварки прежде всего коротких швов на средних и крупных изделиях, в частности, на изделиях каркасно-решетчатого типа. Иногда смещения весьма коротких отрезков линии соединения могут быть сведены к параллельному переносу, так как неучитываемый поворот короткой линии соединения дает погрешности, которыми для большинства практических применений можно пренебречь. При пространственном (трехмерном) параллель-

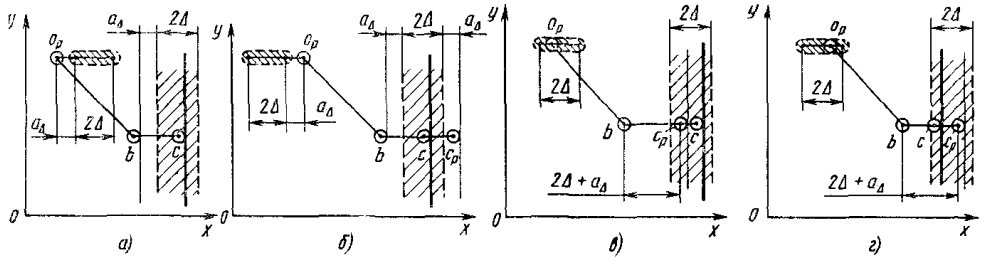


Рис. 6.1. Примеры, поясняющие поиск базовой точки и совмещение начальной точки сварочного движения с линией соединения (одномерная задача)

ном переносе необходимо в общем случае определять положения трех базовых точек, а при плоском (двумерном) — всего лишь двух. Если учитывать только параллельный перенос, процедура адаптации существенно упрощается: она сводится к смещению запрограммированной траектории по двум или трем декартовым координатам.

Отметим, что результаты измерений отклонения базовых точек могут быть использованы не только для вычисления коррекций, но и для компенсирующего поворота изделия или координатной системы манипулятора робота. В этом случае для определения требуемого угла компенсирующего поворота, например, при плоской задаче, достаточно всего двух базовых точек. Так как компенсирующий поворот изделия или координатной системы манипулятора может производиться только вокруг определенных осей, а случайный поворот изделия возможен вокруг любых осей, то после такой компенсации случайного поворота возникает необходимость компенсации параллельного переноса.

При случайном параллельном переносе корректировка программы состоит в автоматическом совмещении в декартовой системе координат начальной точки запрограммированного сварочного движения с фактической начальной точкой линии свариваемого соединения для каждого экземпляра изделия.

Возможны три метода совмещения на основе последовательного определения положения необходимого числа базовых точек: метод непрограммируемых поисковых движений; метод прерывания отработки программируемых поисковых движений; комбинированный метод. Число базовых точек при параллельном переносе выбирают следующим образом: одна базовая точка требуется при одномерном, две — при двумерном (плоском) и три — при трехмерном (пространственном) переносе. Сущность указанных методов применительно к одномерному переносу (случайное смещение по одной координате) иллюстрирует рис. 6.1.

Метод непрограммируемых поисковых движений заключается в том, что после перемещения датчика из исходной точки o_p (рис. 6.1, *а*) в точку b — начало поискового движения — включается непрограммируемое движение поиска в направлении на искомую поверхность (контур). Это движение прекращается после соприкосновения щупа с искомой поверхностью. В этот момент центр щупа

находится в точке c. Точку b выбирают заведомо вне пределов поля отклонения положения искомой поверхности, перед его ближайшей границей. Наибольшее возможное значение хода поискового движения равно $2\Delta + a_\Delta$, где $\pm\Delta$ — отклонение искомой поверхности от среднего положения; a_Δ — запас хода. После достижения точки c система продолжает отработку перемещений по программе.

Метод прерывания отработки программируемых поисковых движений отличается от первого метода тем, что поисковое движение программируется на длину отрезка между точками b и c_p (рис. 6.1,*б*), причем точку c_p выбирают заведомо за пределами поля отклонения положения искомой поверхности — за его дальней границей. На участке bc_p щуп обязательно встречается с искомой поверхностью, после чего поисковое движение прекращается и начинается отработка следующего кадра программы. Максимальное значение хода поискового движения равно $2\Delta + 2a_\Delta$.

Как видно из рис. 6.1, *а*, *б*, оба метода, описанные выше, приводят к смещению начальной точки o_p: в первом случае — к искомой поверхности, а во втором — от нее. При этом в системах, работающих в приращениях (с плавающим началом отсчета) и без запоминания положения (отклонения) базовых точек, требуется процедура возврата в исходное положение o_p перед сваркой очередного экземпляра изделия.

Третий метод — комбинированный и представляет собой сочетание первых двух. Для реализации поиска предусматривается как программируемое, так и непрограммируемое поисковое движение. Если на участке bc_p (рис. 6.1, *в*) программируемого поискового движения щуп не встретится с искомой поверхностью, то, начиная от точки c_p, включается непрограммируемое поисковое движение до встречи щупа с искомой поверхностью в точке c. Если на участке bc_p щуп встретит искомую поверхность, например в точке c (рис. 6.1, *г*), то поисковое движение прекращается. Максимальный ход поискового движения равен (рис. 6.1, *в*) $2\Delta + a_\Delta$.

Первый метод легко реализуется при поисковых движениях, ориентированных вдоль координатных осей, и обеспечивает наименьшее время поиска при прочих равных условиях. Второй метод позволяет осуществлять поисковые движения по любым траекториям, произвольным образом ориентированным относительно координатных осей. Преимущество третьего метода — отсутствие необходимости в процедуре возврата в исходное положение, что особенно важно для систем, работающих в приращениях.

Приведенное выше описание трех методов совмещения дано для систем, в которых не предусматривается запоминание числового значения положения (отклонения) опорных точек. Такие системы должны обеспечивать достаточно точный останов при прекращении поискового движения после выдачи датчиком сигнала о встрече щупа с искомой поверхностью. В системах, запоминающих положения (отклонения) опорных точек, требования к точности останова при прекращении поискового движения могут быть снижены, так как запоминание по команде от датчика может происходить на ходу

и точность указанного останова не влияет на точность последующего совмещения траектории программируемого движения с фактической линией соединения.

Положения в рабочем пространстве программируемых и фактических траекторий движения центра щупа и рабочей точки сварочного инструмента определяются на основе рассмотренных выше методов совмещения.

При последовательном поиске базовых точек в системах, работающих в приращениях, порядок выполнения и направление поисковых движений должны быть такими, чтобы поиск положений каждой последующей базовой точки не нарушал совмещения, достигнутого при поиске предыдущих базовых точек. Такое правило является основополагающим при определении порядка поиска базовых точек изделий с искомыми поверхностями, не параллельными координатным осям.

Рассмотренные принципы распространяются и на трехмерные задачи.

Задачи адаптации рассмотренного класса приходится решать при автоматизации сварки главным образом коротких швов, для которых в большинстве случаев можно принять, что случайные смещения линии соединения сводятся к ее параллельному переносу в пространстве. Для компенсации параллельного переноса короткого шва требуется измерение смещений не более трех базовых точек и весьма простая корректировка программы, а именно смещение начала отсчета.

Отметим, что поиск положения базовых точек и сварка могут осуществляться как одним, так и различными манипуляторами. В последнем случае одна измерительная манипуляционная система может выдавать данные для корректировки программы нескольким технологическим манипуляционным системам.

Рассмотрим теперь второй, более общий, класс задач, для которых характерно не только случайное смещение линии соединения в пространстве, но и случайное искажение ее формы. Для решения задач этого класса в общем случае необходимо определять для каждого экземпляра изделия реализацию случайной вектор-функции, характеризующей текущую коррекцию положения и ориентации горелки относительно изделия (по сравнению с текущим программным ее положением и ориентацией) с целью компенсации случайных отклонений линии соединения от запрограммированной траектории.

Для швов с большим радиусом кривизны требуемые изменения ориентации горелки, связанные с малыми отклонениями линии соединения от расчетного положения, весьма малы, а их влияние на качество сварного соединения незначительно. Поэтому при сварке швов с большим радиусом кривизны достаточно определять три линейных составляющих смещения линии соединения относительно программного положения и соответствующим образом корректировать текущее положение горелки (точки сварки) относительно изделия, не меняя угла γ ее ориентации (рис. 6.2). В общем случае система координат $X_э Y_э Z_э$ изменяет свою ориентацию относительно

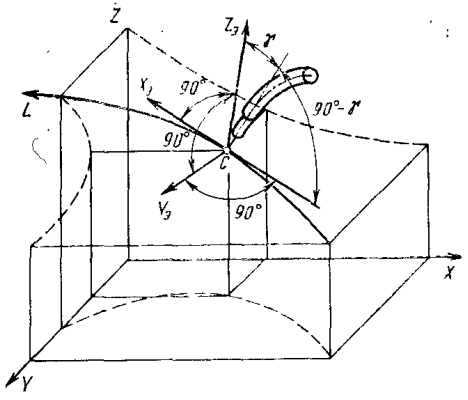


Рис. 6.2. Коррекция положения горелки относительно изделия

базовой системы XYZ при движении точки сварки C по линии шва L. Составляющая вдоль оси $X_э$ в рассматриваемом случае необходима только при сварке незамкнутых швов — для определения момента начала и конца сварки. На остальном протяжении шва эта составляющая может не использоваться, так как она практически не влияет (при сварке швов с большим радиусом кривизны) на отклонение линии сопряжения от программного положения оси горелки. Таким образом, собственно текущая адаптация при сварке швов с большим радиусом кривизны требует определения двух составляющих отклонения линии соединения от расчетного положения — вдоль осей $Y_э$ и $Z_э$ — и соответствующей коррекции положения горелки без изменения ее программной ориентации. Для измерения значения и знака указанных составляющих могут быть использованы два относительно простых однокоординатных датчика или один двухкоординатный датчик. Текущая ориентация таких датчиков должна осуществляться по собственной программе. В общем случае для ориентации таких датчиков требуется дополнительная управляемая ориентирующая подвижность, например, вращение вокруг оси электрода.

При наличии двух других ориентирующих подвижностей техническая реализация третьей подвижности — вокруг оси горелки — представляет определенные трудности. Поэтому реализация третьей ориентирующей подвижности обычно осуществляется вращением двухкоординатного ориентирующего механизма вокруг оси, перпендикулярной двум осям вращения этого механизма. При сочетании вращений вокруг трех взаимно непараллельных осей обеспечивается любая требуемая ориентация оси горелки в пространстве и ориентация датчиков, закрепленных неподвижно относительно горелки, вдоль направлений $Y_э$ и $Z_э$ либо перпендикулярно поверхностям свариваемых элементов. Для ряда частных задач можно обойтись без дополнительной подвижности. Например, при сварке широко распространенных угловых швов в наиболее удобном (нижнем) положении для изменения ориентации датчиков может быть использовано вращение горелки вокруг вертикальной оси, что предусмотрено во многих моделях роботов с прямоугольной системой координат.

Измерение отклонений указанными датчиками может осуществляться непрерывно или периодически (с последующей интерполяцией значений отклонений между точками измерения) во время сварки или до сварки на холостом ускоренном проходе по исходной программе с запоминанием значений отклонений либо откорректированной программы.

Для швов, имеющих участки с весьма малым радиусом кривизны, что характерно для закруглений различных конструктивных элементов, нельзя пренебречь требуемыми изменениями ориентации горелки, связанными с отклонением соответствующих точек линии соединения от расчетного положения. Задача текущей геометрической адаптации здесь существенно усложняется, что обусловлено необходимостью определять текущую коррекцию не только положения, но и ориентации горелки относительно изделия; большой скоростью изменения переносных и ориентирующих координат при сварке на закруглениях, а также техническими трудностями получения информации о положении линии соединения на закруглениях малого радиуса. Поэтому для швов с малыми радиусами кривизны целесообразно комбинированное решение задачи адаптации, основанное на том, что участки с малым радиусом кривизны имеют малую длину и могут рассматриваться как случайным образом смещенные в пространстве без искажения их формы.

Для измерения отклонений линии соединения во время сварки при выполнении швов сложной формы и швов «в упор» (т. е. до стенки, пересекающей шов) датчики необходимо располагать сбоку от точки сварки. При сварке прямолинейных участков швов датчики положения линии соединения могут располагаться перед точкой сварки. При сварке швов небольшой кривизны в отдельных случаях датчики могут располагаться перед точкой сварки при условии, что прямая, соединяющая точку измерений и точку сварки, интерпретируется программой как хорда к линии соединения. Измерение отклонений до начала сварки можно осуществлять в точке, расположенной произвольно относительно рабочей точки горелки, однако наиболее удобно совмещать точку измерения с рабочей точкой горелки.

6.3. Технические средства адаптации промышленных роботов для дуговой сварки

В тех случаях, когда линию соединения можно рассматривать как смещенную случайным образом в пространстве без искажения ее формы и размеров, в качестве датчиков поиска базовых точек для адаптации могут применяться тактильные датчики или локационные датчики расстояния до поверхностей свариваемых элементов (рис. 6.3).

В качестве тактильных датчиков могут быть использованы электромеханические датчики координатно-измерительных машин или специально разработанные для сварки электромеханические тактильные датчики. Подобный датчик позволяет осуществлять поиск в любом направлении, перпендикулярном оси щупа, а также вдоль его оси. В зависимости от типа первичного преобразователя выходная характеристика датчика может быть релейной либо иметь многоступенчатый или линейный участок. Датчики такого типа размещают на определенном расстоянии от горелки, и их можно крепить не только к горелке, т. е. к последнему звену манипуляционной

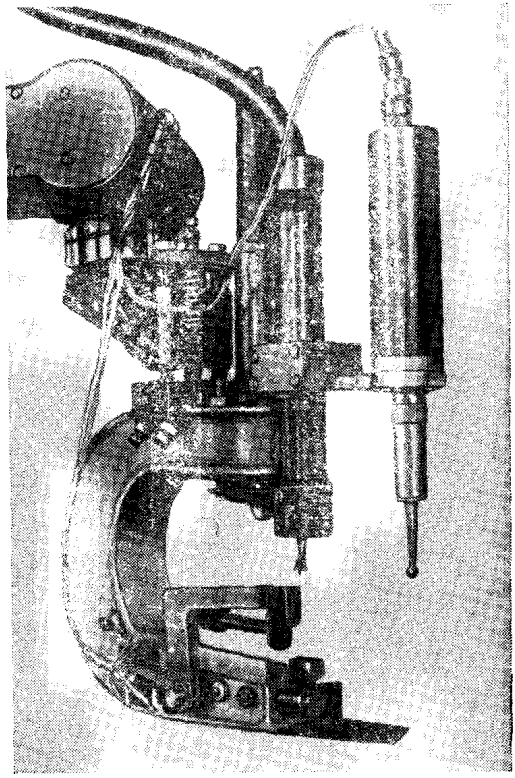


Рис. 6.3. Робот для дуговой точечной сварки с электромеханическим тактильным датчиком поиска базовых точек для дуговой точечной сварки

системы, но и к другим ее звеньям. При этом датчик в ряде случаев должен быть подведен для измерения в рабочее положение и отведен на время сварки отдельным приводным механизмом.

Известен также датчик с кольцевым щупом, расположенным концентрично сварочному электроду. Такой датчик крепится неподвижно относительно горелки и не требует механизма подвода-отвода. Кроме того, преимуществом такого расположения датчика является возможность его использования (при определенном положении горелки) и для текущего измерения отклонения линии соединения от программного положения. Необходимо заметить, что принцип поиска базовых точек с помощью электромеханического датчика используется и в устройствах защиты сварочного инструмента от повреждения при случайном столкновении с изделием, сборочно-сварочным приспособлением или другими элементами РТК вследствие неправильного функционирования системы или ошибок оператора.

Весьма удобным для поиска базовых точек является метод измерения их смещения непосредственно с помощью сварочного электрода, на который на время измерения подается повышенное переменное напряжение повышенной частоты. Для этой цели используется напряжение 400 В частотой 600 Гц. Для увеличения точности электрод перед измерением выдвигается до достижения контакта с упором (базовым элементом РТК).

Для поиска базовых точек могут быть также использованы электромагнитные, струйные и другие датчики расстояния до поверхности свариваемых элементов. При этом для поиска в трех основных направлениях декартовой системы координат применяют блоки из трех датчиков. Если используется только один датчик, то манипуляционная система должна так ориентировать его, чтобы направление измерения было перпендикулярно поверхности, на которой расположена искомая базовая точка.

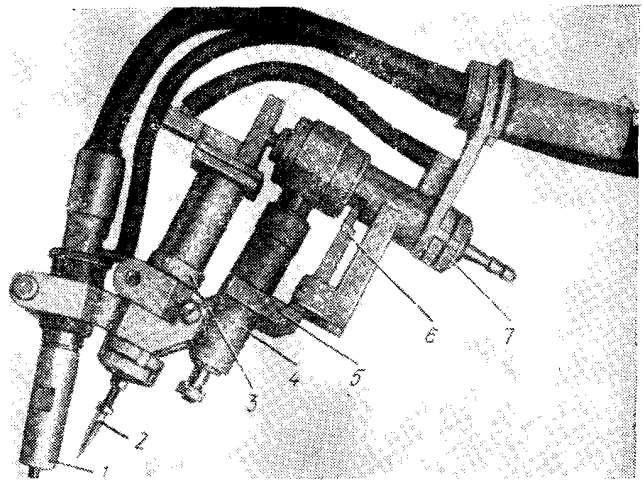


Рис. 6.4. Устройство периодического прямого копирования для текущей адаптации Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР:

1 — горелка; *2* — щуп; *3* — пневмоцилиндр выдвижения щупа; *4* — ползун перемещения горелки вдоль электрода; *5* — фиксатор горелки; *6* — втулка, обеспечивающая качание горелки поперек оси электрода; *7* — пневмоцилиндр привода фиксатора

При текущей пространственной адаптации роботов для дуговой сварки в ряде случаев может быть применено устройство периодического прямого копирования (рис. 6.4). Точка копирования этого устройства расположена на расстоянии 8—10 мм от точки сварки. В качестве щупа используется клиновидный палец. Цикл корректировки положения сварочного инструмента состоит из освобождения фиксатора горелки по двум степеням подвижности (вдоль оси электрода и поперек этой оси и линии соединения), движения щупа до упора в поверхности свариваемых элементов, последующей фиксации инструмента, а затем отвода щупа от изделия на расстояние ~20 мм. Приводы механизмов перемещения щупа и фиксации инструмента пневматические.

Первый цикл корректировки выполняется до начала сварки. Частота следования циклов корректировки и положение точек копирования на линии соединения определяются в зависимости от ожидаемой скорости изменения рассогласования между расчетным и фактическим положениями линии соединения, кривизны последней, от допускаемого отклонения сварочного инструмента от линии соединения, а также от расположения прихваток. Так как щуп в каждом цикле корректировки находится вблизи зоны сварки лишь в течение нескольких десятых долей секунды, то он практически не загрязняется и не нагревается. Еще более благоприятные условия работы для такого устройства обеспечиваются при импульсной сварке, когда корректировка может осуществляться во время прерывания дуги. Наиболее удобно применять такие устройства при сварке угловых швов небольшой кривизны без прихваток или с прихватками, расположенными в точно определенных местах.

В специализированных роботах для сварки в качестве устройств текущей пространственной адаптации можно использовать устрой-

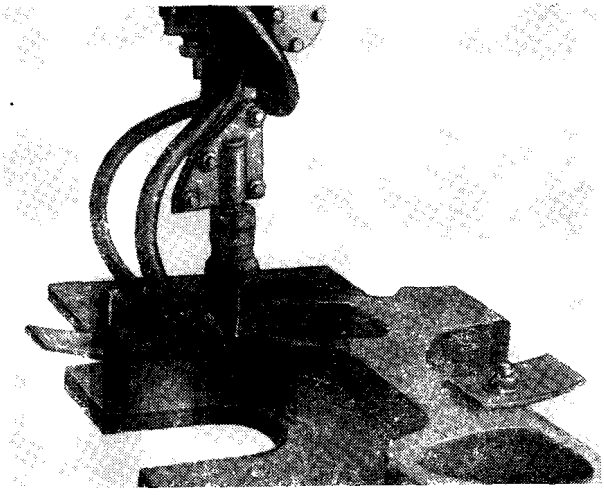


Рис. 6.5. Устройство непрерывного прямого копирования для адаптации специализированного робота

ства прямого копирования непрерывного действия. В этом случае сварочная горелка должна иметь свободную (неприводную) подвижность в одном или двух направлениях и быть жестко связанной со щупом (щупами), прижимаемым к поверхностям свариваемых элементов пружиной либо под действием давления жидкости или газа. Наиболее просто реализовать прямое копирование при сварке угловых швов тавровых соединений и угловых соединений изнутри угла. В качестве копирующих элементов используются ролики (рис. 6.5) или пальцы, расположенные сбоку от точки сварки, либо изолированное кольцо, расположенное концентрично оси рабочей части горелки.

В системах текущей адаптации специализированных роботов находят также применение электромеханические датчики. Основной особенностью этих датчиков является наличие у них копирующего элемента — щупа, который под действием пружин находится в контакте с копируемыми поверхностями. Преобразователь датчика практически полностью защищен его корпусом от воздействия электромагнитных полей, светового и теплового излучений, брызг расплавленного металла, пыли, газов, случайных механических повреждений. Поэтому в датчиках рассматриваемого типа применяются преобразователи самых различных видов: электроконтактные, резистивные, электромагнитные, фотоэлектрические, емкостные и др. Достаточно широко используются при сварке двухкоординатные электромеханические датчики с наклонным расположением оси щупа по отношению к поверхности изделия (рис. 6.6). Точка копирования таких датчиков обычно располагается перед точкой сварки, но при использовании раздвоенного щупа возможно копирование линии таврового или внутреннего углового соединения в двух точках сбоку от точки сварки.

Расположение точки копирования перед точкой сварки в общем случае обусловливает необходимость перемещения датчика вдоль

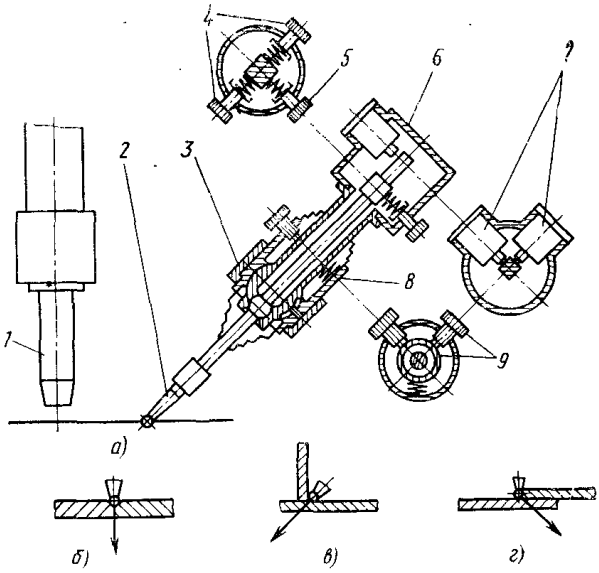


Рис. 6.6. **Двухкоординатный электромеханический датчик:** *а* — схема установки; *б* — направление усилия копирования при сварке стыковых швов; *в*, *г* — то же, для угловых швов; *1* — горелка; *2* — щуп; *3* — шарнир поворота щупа в корпусе датчика; *4* — корректоры направления и усилия копирования поперек оси электрода; *5* — корректор копирования вдоль оси электрода; *6* — корпус первичных преобразователей; *7* — первичные преобразователи; *8* — корпус датчика; *9* — корректоры нулевых положений вдоль и поперек оси электрода

линии соединения по программе с опережением, равным времени перемещения точки сварки вдоль линии шва на расстояние между точкой сварки и точкой измерения, а также вычисления отклонения линии соединения от расчетного положения для точки измерения и использования полученной информации для корректировки программы с соответствующей задержкой по времени.

В адаптивных промышленных роботах для дуговой сварки находят применение пневматические датчики двух типов, которые позволяют измерять расстояние до поверхности изделия. Датчик типа сопло-заслонка, т. е. дроссельного типа, работает при избыточном давлении питания $P_0 = 0{,}14$ МПа и обеспечивает выходной сигнал $P = (0{,}02 \div 0{,}1)$ МПа. Диаметр отверстия сопла $d_i = (0{,}5 \div 1{,}0)$ мм, диаметр дросселя $d_д = 0{,}25$ мм. Наибольшее расстояние, контролируемое датчиком, составляет десятые доли миллиметра, что затрудняет его использование при грубых поверхностях, характерных для многих свариваемых изделий.

Датчик, основанный на использовании давления отраженной струи, работает при избыточном давлении питания $P_0 = (0{,}1 \div 0{,}2)$ МПа. С помощью этого датчика можно контролировать положение поверхности изделия на расстоянии до 6 мм. Перспективно использование струйно-акустических датчиков, в которых выходной сигнал определяется параметрами ультразвуковых колебаний, возникающих в результате взаимодействия воздушной струи с поверхностью изделия. Два струйных датчика можно использовать для измерения положения линии таврового или углового соединения с внутренней стороны. Сканирующий струйно-акустический датчик применяют для определения не только отклонения линии соединения, но и для измерения параметров разделки, т. е. для решения задач технологической адаптации.

При роботизированной дуговой сварке весьма перспективны системы очувствления с использованием самой сварочной дуги как датчика расстояния до поверхности свариваемых элементов. В качестве информативного параметра используется сварочный ток и/или напряжение дуги в зависимости от вида характеристики источника питания. При пологой характеристике основная информация содержится в значении силы тока, а при крутопадающей характеристике — в напряжении дуги. Сканирование дуги движения робота поперек линии соединения при сварке угловых швов позволяет определить смещение оси электрода как в поперечном, так и в продольном (вдоль оси электрода) направлении. Информация о поперечном смещении содержится в разности сил сварочных токов для крайних точек колебательного движения электрода или в разности интегральных значений сил токов за время нахождения электрода слева и справа от среднего положения по отношению к амплитуде смещений. Информация о продольном смещении электрода содержится в разности суммарного значения сил указанных токов и некоторого эталонного значения. Колебания электрода обычно обеспечиваются манипулятором сварочной горелки. Для задания колебаний достаточно при обучении ввести в систему управления робота их амплитуду и частоту и иметь программу наложения колебательных движений на основное движение робота.

Главные достоинства систем очувствления с использованием сварочной дуги в качестве датчика: измерение непосредственно в точке сварки, что исключает погрешности, связанные с несовпадением точки измерения и точки сварки; управление положением самой дуги, а не оси горелки; отсутствие в зоне сварки каких-либо измерительных или других устройств, необходимых для определения положения соединения.

Большой интерес представляют электромагнитные датчики положения и геометрических параметров соединения (зазор, превышение кромок, площадь сечения разделки), подготовленного под сварку. Это связано с простотой датчиков данного типа, их малыми габаритными размерами, возможностью применения при сварке изделий из магнитных и немагнитных материалов, а также возможностью получения интегральных усреднений результатов измерений по некоторой площади. Вместе с тем на выходной сигнал электромагнитных датчиков в условиях сварки могут оказывать влияние целый ряд мешающих факторов, которые должны быть учтены с помощью специальных измерительных схем и каналов. Определенное размещение датчика или сочетание двух датчиков позволяет использовать их для реализации различных сварных соединений.

Однако использование электромагнитных датчиков накладывает ограничения на технологию сварки роботами. С помощью этих датчиков не представляется возможным вести сварку с текущей адаптацией в угловых участках внутри коробчатых конструкций, так как при этом требуется отвод датчиков. Электромагнитные датчики нельзя также использовать для текущей адаптации при сварке угловых соединений как внутри, так и снаружи без изменения их

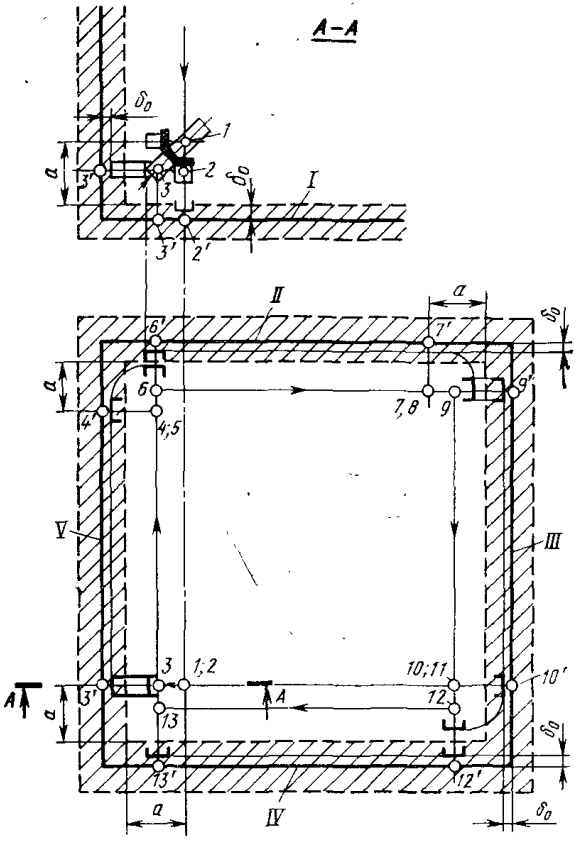


Рис. 6.7. Схема поиска базовых точек для сварки изнутри в углах при изготовлении коробчатых изделий с использованием индукционных датчиков

положения. Кроме того, они существенно ограничивают поперечные колебания горелки.

Реализация элементов начальной и текущей адаптации при использовании электромагнитных датчиков для тех случаев, когда непрерывная сварка с текущей адаптацией невозможна, иллюстрирует рис. 6.7.

При сварке в нижнем положении внутри прямоугольного коробчатого изделия начальная адаптация осуществляется в следующем порядке:

из начального положения в положение *1* на маршевой скорости;

из положения *1* в положение *2* на скорости поиска (поиск нижней стенки *I*);

из положения *2* в положение *3* на скорости поиска (поиск точки *3′* левой стенки *V*);

из положения *3* в положение *4* на маршевой скорости с поддержанием постоянного расстояния *a* от оси горелки до левой и нижней стенок (поиск точки *4′* левой стенки);

из положения *4* поворот горелки вокруг вертикальной оси до положения *5* (для простоты рассмотрения в качестве оси поворота выбрана вертикаль, проходящая через точку пересечения оси горелки и осей датчиков);

из положения *5* в положение *6* на скорости поиска (поиск точки *6′* задней *II* и нижней *I* стенок);

из положения *6* в положение *7* на маршевой скорости с поддержанием постоянного расстояния от задней и нижней стенок (поиск точки *7′* задней стенки);

из положения *7* поворот в положение *8*;

из положения *8* в положение *9* на скорости поиска (поиск точки *9′* правой *III* и нижней *I* стенок);

из положения *9* в положение *10* на маршевой скорости с поддержанием постоянного расстояния от правой и нижней стенок (поиск точки *10′* правой стенки);

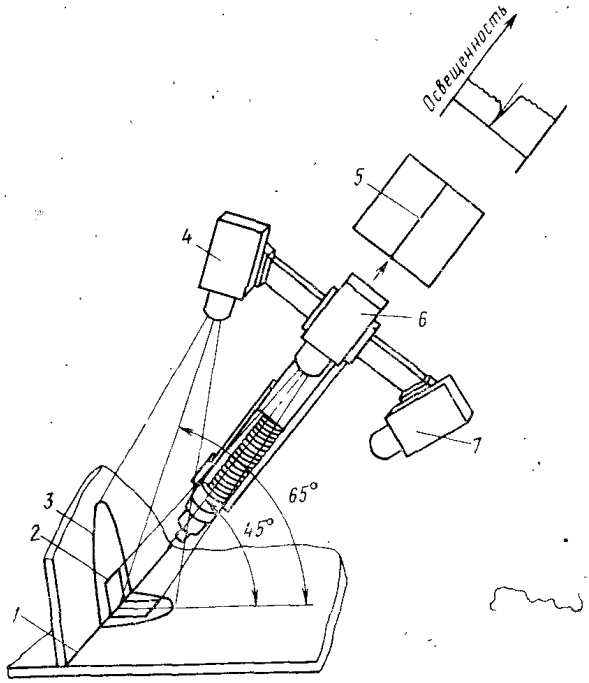


Рис. 6.8. Схема определения положения линии таврового соединения с помощью датчика:

1 — линия соединения свариваемых элементов; *2* — зона видимости; *3* — зона освещения; *4* — осветитель; *5* — изображение линии соединения на видеоконтрольном устройстве; *6* — фотоприемник; *7* — проектор перемещающегося светового пятна

из положения *10* поворот в положение *11*;

из положения *11* в положение *12* на скорости поиска (поиск точки *12'* передней *IV* и нижней *I* стенок);

из положения *12* в положение *13* на маршевой скорости с поддержанием постоянного расстояния от передней и нижней стенок (поиск точки *13'* передней и нижней стенок).

После поиска 12 точек: *3'*, *4'*, *6'*, *7'*, *9'*, *10'*, *12'*, *13'* на боковых стенках и *6'*, *9'*, *12'*, *13'* на нижней стенке система готова к сварке. *Сварка в углах ячейки между точками, соответствующими* точкам *4'* и *6'*, *7'* и *9'*, *10'* и *12'*, *13'* и *3'*, выполняется без текущей адаптации; в остальных точках — с текущей адаптацией. Сварка может начинаться в любой из точек линии сопряжения свариваемых элементов, где возможна текущая адаптация. Сварка в углах ячейки *выполняется по программе, но* с учетом параллельного переноса в пространстве линии сопряжения свариваемых элементов углового участка.

При том же расположении датчиков сварка угловых швов угловых соединений снаружи при изготовлении коробчатого изделия (приварка верхней стенки к четырем вертикальным стенкам) возможна только с начальной адаптацией.

Для определения положения кромок датчики должны обеспечивать с достаточной точностью информацию не только о достижении расстояния δ_0 до поверхности изделия, но и о смещении $\delta_к$ с кромки. Перемещение между точками *2* и *3*, *6* и *7*, *8* и *9*, *12* и *13* и т. д. происходит по линии, параллельной расчетному положению соответствующей поверхности изделия.

Наибольшее количество информации для решения задач адаптации сварочных роботов могут представить СТЗ. Однако эти системы весьма сложны и дороги, а, главное, во многих случаях их применение для определения положения линий соединения на свариваемом изделии затруднено тем, что эти линии недостаточно контрастны на фоне остальной части изделия. Поэтому разрабатывают системы технического зрения, специально ориентированные на использование

в сварочных роботах, основной особенностью которых является применение специального освещения, триангуляционных методов измерения формы объектов наблюдения и специальных способов выделения необходимой информации. Так, при сварке угловых швов тавровых соединений проектор с мощной ксеноновой лампой освещает зону соединения под углом 65° к горизонтали, а видеодатчик направлен на эту же зону под углом 45° (рис. 6.8). За счет разных углов падения светового потока на вертикальный и горизонтальный свариваемые элементы их освещенность оказывается различной (см. график освещенности на рис. 6.8).

Аналоговый сигнал, пропорциональный освещенности, конвертируется в четырехбитовый цифровой сигнал (уровни освещенности 0—15), который поступает в мини-ЭВМ для обработки и выдачи информации для корректировки программы. Для определения положения начала и конца шва в зону наблюдения проецируется специальная точка. Появление точки в зоне наблюдения свидетельствует о наличии шва под датчиком, а ее исчезновение — о проходе конца шва под датчиком. Эта информация используется для формирования команд начала и окончания сварки.

Более универсальным является способ, основанный на триангуляционном измерении площади сечения зоны, прилегающей к линии соединения, световой плоскостью, которая может быть представлена сканирующим точечным лучом, стационарным щелевым лучом или светотеневой границей.

В системах с применением триангуляционного метода могут быть также определены зазор в соединении (превышение кромок) и сечение разделки или заплавляемой части соединения (для угловых соединений снаружи).

При использовании оптических СТЗ в роботах для дуговой сварки необходимо учитывать помехи от светового излучения дуги и брызг расплавленного металла. Кроме того, оптика видеодатчиков на сварочных роботах подвергается интенсивному загрязнению и эрозии пылью, брызгами металла и агрессивными газами. Измерения, выполняемые для каждого изделия во время сварки, требуют применения специальных осветителей и фильтров, в частности осветителей с модулированным световым потоком, и использования инфракрасной части спектра. Эти меры позволяют в известной степени уменьшить помехи от светового излучения дуги.

В ряде случаев могут применяться и более простые видеодатчики. Например, при сварке в защитных газах угловых швов может быть использован отраженный свет излучения дуги. При направлении дуги строго по биссектрисе угла среднестатическая освещенность в точках, выбранных на некотором удалении от места сварки, одинакова. При смещении дуги на один из свариваемых элементов освещенность будет неравномерной. Освещенность воспринимается двумя фоторезисторами с помощью световодов и бленд. Проблема охлаждения фоторезисторов здесь решается путем расположения их вдали от горелки. Однако недостатком такой системы является отсутствие возможности автоматизации процесса выхода на шов до на-

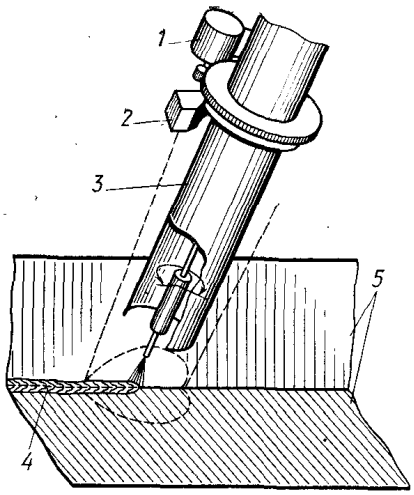


Рис. 6.9. Датчик с круговым сканированием:
1 — двигатель кругового сканирования; *2* — датчик; *3* — горелка; *4* — сварной шов; *5* — поверхности свариваемых элементов

чала сварки. Одним из путей уменьшения чувствительности к световым помехам является использование монохроматического освещения с помощью лазера. Применением лазера решается также проблема получения остросфокусированного светового зонда.

Для того чтобы обеспечить возможность измерения в зонах, расположенных как перед точкой сварки, так и после этой точки, применяют метод кругового сканирования луча вокруг точки сварки. При этом за один цикл сканирования осуществляется измерение одного цилиндрического или конического сечения соединения, подготовленного под сварку, и одного цилиндрического или конического сечения полученного сварного соединения. Система, реализующая такой метод измерения, основана на использовании лазерного дальномера с применением принципа триангуляции (рис. 6.9). В качестве излучателя может быть использован полупроводниковый лазер из арсенида галлия с мощностью от 1 до 10 Вт в импульсе, работающий на волне длиной 904 нм (ближний инфракрасный свет). Излучение лазера формируется оптической системой в тонкий луч диаметром 2 мм у выхода оптической системы и 0,3 мм — на расстоянии 180 мм. На поверхность изделия проецируется яркое пятно соответствующего диаметра. Положение указанного пятна наблюдается под углом 15—20° к оси этого луча второй оптической системой, которая фокусирует изображение пятна на линейке приборов (фотодиодов) с зарядовой связью (ПЗС). Расстояние между центрами элементов такой линейки может составлять 10—15 мкм, а ее чувствительность достаточна для получения различимого импульса в достаточно широком диапазоне изменения коэффициента отражения поверхности изделия. Для уменьшения влияния света дуги перед приемником ПЗС устанавливают интерференционный фильтр. Оптическая система обеспечивает разрешающую способность примерно 0,3—0,5 мм в зависимости от расстояния от выходного отверстия оптической системы лазерного излучателя, изменяемого в диапазоне 100—200 мм, и случайных помех.

Полученная информация подвергается предварительной фильтрации для измерения расстояния, которое является функцией текущего положения горелки. В результате многократных измерений (примерно 200 в течение одного поворота датчика вокруг горелки) формируется полная трехмерная модель свариваемого соединения в зоне вокруг места сварки. Эта модель позволяет определить: угол разделки или угол между свариваемыми элементами; превыше-

ние кромок; форму наплавленного валика; расстояние между горелкой и поверхностью изделия; угол между осью горелки и линией соединения.

Для полного использования информации, получаемой с помощью датчика такого типа, система управления должна включать 16-разрядный микропроцессор. Кроме того, верхний уровень системы управления должен содержать математическую модель процесса сварки, которая может быть использована для управления режимом сварки в зависимости от геометрических параметров как разделки, так и получаемого сварного соединения.

Принцип измерения положения свариваемого соединения и конструкцию датчиков выбирают исходя из таких факторов, как тип сварного соединения, размеры свободного пространства в зоне, прилегающей к соединению, материал изделия, характер его поверхности и кромок, подготовленных под сварку, особенности технологического процесса изготовления изделия, экономических факторов и т. п.

Так как роботы, в том числе и сварочные, являются универсальными легко перепрограммируемыми технологическими машинами, то для них предпочтительными являются такие принципы измерений, которые в сочетании с соответствующим программным обеспечением обеспечивают наибольшую универсальность измерительных средств. Поэтому наиболее перспективными являются видеосенсоры и способы измерения, основанные на использовании сварочной дуги. Вместе с этим для ряда частных задач успешно могут применяться и более простые средства, основанные на применении электромагнитных, электромеханических, пневматических методов измерения, а также устройства прямого копирования.

Глава 7 СБОРОЧНЫЕ АДАПТИВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ

7.1. Сборочное технологическое оборудование для производства радиоэлектронной аппаратуры

В настоящее время создано большое количество высокопроизводительного оборудования для производства радиоэлектронной аппаратуры. Дальнейшее резкое повышение эффективности этого производства может быть обеспечено лишь путем его комплексной автоматизации, создания гибких производственных систем, способных адаптироваться к изменяющимся условиям производства.

Первым шагом к созданию гибких производственных систем являются автоматические линии, широко применяемые в производстве радиоэлектронной аппаратуры. Такие системы должны адаптироваться к изменениям номенклатуры выпускаемых изделий, состояния технологиче кого оборудования, самих технологических процессов, параметров материалов, заготовок печатных плат и комплектующих изделий.

Гибкая производственная система, предназначенная для радиоэлектронной промышленности, в общем случае состоит из ряда автоматических роботизированных рабочих мест, связанных автоматической транспортной сетью с устройствами загрузки и разгрузки.

Можно рассматривать три уровня управляющих устройств, на которых решаются определенные задачи.

К устройствам первого уровня относятся локальные системы управления оборудованием: командоаппараты, устройства ЧПУ, системы управления роботами, автооператорами, транспортными средствами. Возможности этих систем определяются характеристиками оборудования и часто ограничиваются решением логических задач.

Второй уровень устройств обеспечивает оперативное управление путем передачи соответствующих программ на локальные системы управления. Здесь реализуется автоматический и полуавтоматический режимы работы.

Системы управления третьего уровня координируют работу гибкой производственной системы в целом. Они обрабатывают административную и производственную информацию, регулируют график работы оборудования и технологические маршруты, принимают организационные решения.

Далее рассмотрим вопросы построения систем управления первого и второго уровней.

Наиболее сложными и трудоемкими в производстве радиоэлектронной аппаратуры являются сборочные операции. Под сборкой здесь понимается установка радиоэлементов на печатную плату, осуществляемая автоматически на специализированном оборудовании. При этом нужные точки печатной платы последовательно подводятся под установочную головку, куда подаются необходимые радиоэлементы. Для выполнения сборочных операций в наибольшей степени требуются системы управления, приспосабливающиеся к изменениям номенклатуры выпускаемой продукции.

Локальные системы управления в сборочном оборудовании могут состоять из контроллера на основе мини-ЭВМ, быстродействующего устройства считывания с ленты, а также запоминающего устройства с большой емкостью и нескольких периферийных устройств, в число которых могут быть включены быстродействующее печатающее устройство, перфоратор, телетайп и дисплей с клавиатурой.

Позиционирование стола может осуществляться приводами на основе двигателей постоянного тока, включенных в систему с обратной связью, измерительным звеном которого является фотоэлектрический датчик перемещения.

Станки отличаются высоким быстродействием и точностью. Для примера приведем краткие технические характеристики станка мод. 6797:

Скорость установки, элементов в 1 ч	3800
Скорость перемещения стола, м/мин	15,2
Погрешность позиционирования, мм	0,05
Допустимая нагрузка, Н	230

Отечественная промышленность также выпускает ряд станков-автоматов, которые являются промышленными роботами для сборки радиоэлектронной аппаратуры. Однако они имеют ограниченную производительность, так как в них используются приводы, построенные на базе шаговых двигателей с системами ЧПУ.

Адаптивный электропривод на двигателях постоянного тока, который реализует оптимальное по быстродействию управление, предназначен для высокопроизводительного сборочного оборудования в производстве радиоэлектронной аппаратуры. При этом обеспечивается максимальное быстродействие путем адаптации к перемещениям. Динамические характеристики такого привода значительно превосходят динамические характеристики привода на шаговых двигателях.

Станки с таким адаптивным приводом имеют следующие характеристики:

Скорость установки, элементов в 1 ч	7200
Скорость перемещения стола, м/мин	18
Погрешность позиционирования, мм	0,01

Для обеспечения оптимального по быстродействию управления необходимо реализовать достаточно сложный закон управления.

Упрощенное дифференциальное уравнение движения привода имеет вид

$$T_м = \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d\theta}{dt} = kU,$$

где $T_м$ — электромеханическая постоянная времени двигателя с приведенным к валу моментом инерции; θ — угол поворота выходного вала; k — постоянный коэффициент; U — напряжение, приложенное к яркой цепи.

На движение привода накладываются ограничения

$$-U_m \leqslant U < U_m; \quad \left|\frac{d\theta}{dt}\right| \leqslant V_m,$$

где V_m — максимальная угловая скорость вала.

Начальное состояние системы определяется как

$$\begin{cases} \left.\dfrac{d\theta}{dt}\right|_{t=0} = 0; \\ \theta|_{t=0} = \theta_н. \end{cases}$$

Пусть необходимо перевести систему в состояние

$$\begin{cases} \left.\dfrac{d\theta}{dt}\right|_{t=t_{пер}} = 0; \\ \theta|_{t=t_{пер}} = 0; \end{cases}$$

где $t_{пер}$ — время перехода системы.

Задача заключается в определении такого закона изменения управляющего сигнала U^*, при котором выполняется условие

$$t_{пер}(\theta_н, U^*) = \min t_{пер}(\theta_н, U).$$

Согласно принципу максимума для оптимальности по быстродействию следует выбирать управление, доставляющее максимум функции

$$H = \psi_1 x_2 + \psi_2 \frac{kU - x_2}{T_м},$$

где ψ_1, ψ_2 — некоторые ненулевые и непрерывные функции; $x_2 = d\theta/dt$.

Можно показать, что управляющее воздействие, минимизирующее время перехода, будет иметь интервал подачи разгоняющего привод воздействия $U_m(t)$ и интервал торможения под воздействием управления $U = \operatorname{sign} \psi_2 U_m$ или

$$U = \operatorname{sign}[C_2 \exp(t/T_м) + C_1 T_м] U_m(t),$$

где C_1, C_2 — постоянные интегрирования.

После преобразований получим общий вид фазовой траектории оптимального торможения

$$\theta = kU_m T_м \ln\left(1 + \frac{V}{kU_m}\right) - T_м V = F(V).$$

Структурная схема привода представлена на рис. 7.1.

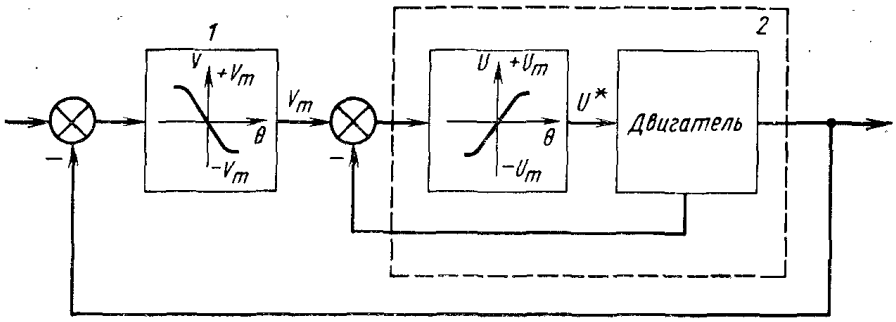


Рис. 7.1. Структурная схема АСУ ТП участка сборки печатных плат

Блок *1* вычисления требуемой скорости формирует задание контуру *2* отслеживания скорости. Информацией, необходимой для работы блока *1*, являются рассогласование θ и ограничение на скорость V_m. Выходной сигнал блока *1* вычисляется следующим образом:

$$V_{\text{тр}} = \gamma \operatorname{sign} \theta F_1,$$

где

$$F_1 = \begin{cases} F^{(-1)}(|\theta|), & F^{(-1)}(-|\theta|) < V_m; \\ V_m, & F^{(-1)}(-|\theta|) \geqslant V_m; \end{cases}$$

$\gamma < 1$ — коэффициент запаса, учитывающий неточность задания параметров системы и динамические погрешности контура *2*.

Как показывает практика, выбор коэффициента $\gamma = 0{,}95 \div 0{,}85$ обеспечивает отсутствие перерегулирования.

В соответствии с определенным выше законом оптимального по быстродействию управления синтезировано устройство управления прецизионным быстродействующим приводом, которое условно можно разделить на основные функциональные блоки: анализатор направления движения; счетчик реверсивный; регулятор скорости.

Данная система выполнена в конструктивах ЕС ЭВМ на микросхемах серий К155 и К553.

В качестве датчиков обратной связи в быстродействующих прецизионных приводах постоянного тока используются обтюрационные растровые фотоэлектрические датчики угловых перемещений, которые кинематически связываются с валом двигателя постоянного тока.

Фотоэлектрический датчик угла формирует три серии сигналов, функционально связанных с углом поворота его вала. Серии А и В предназначены для измерения углового положения, серия С служит для фиксации точки отсчета.

Основные технические характеристики

Разрешающая способность, рад	л/100
Максимальная угловая скорость входного вала, рад/с	1200
Максимальное угловое ускорение, рад/с^2	$4 \cdot 10^4$
Момент инерции, кг·м^2	$5 \cdot 10^{-6}$

Габаритные размеры, мм:	
длина	70
диаметр	62
Масса, кг	0,3
Напряжение источников питания, В	+5; ±12

Усилитель мощности, являясь составной частью любой системы автоматического управления, в значительной мере определяет качество всей системы в целом, и к нему предъявляют ряд специфических требований:

малое время запаздывания;

хорошая перегрузочная способность, позволяющая обеспечить пусковой и реверсивный ток двигателя;

обеспечение динамического или рекуперативного торможения двигателя, что необходимо для импульсного управления его скоростью;

малое выходное сопротивление усилителя;

достаточно высокая частота коммутации, необходимая для обеспечения малых пульсаций тока в цепи якоря двигателя.

Из большого количества усилителей мощности, применяемых для систем автоматического регулирования, наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют полупроводниковые усилители, работающие в режиме переключений (класс Д). Усилители такого рода с широтно-импульсной модуляцией обладают рядом преимуществ по сравнению с усилителями других типов.

Основные технические характеристики усилителя мощности

Несущая частота ШИМ, кГц	0—50
Максимальное выходное напряжение, В	40
Максимальный выходной ток, А	50
Питание — трехфазная сеть 220/380 В, 50 Гц	

Как уже отмечалось, локальные системы управления предназначены для управления отдельными единицами оборудования. В данном случае каждая локальная система управляет одним робототехническим комплексом, состоящим из сборочного автомата, автоматизированных бункерных накопителей и специализированного промышленного робота, осуществляющего загрузочно-разгрузочные операции. Работа локальной системы управления определяется технологической программой, введенной в оперативную память оператором или системой управления второго уровня.

В состав локальной системы управления (рис. 7.2) входят устройство программного управления; пульт управления; фотосчитывающее устройство; интерфейсные блоки.

Устройство программного управления построено на микроЭВМ «Электроника-60». Специальное программное обеспечение устройства программного управления содержит монитор, инициирующий работу системы; драйвер клавиатуры; драйвер центра управления, осуществляющий прием сигналов внешних устройств, выполнение команд центра управления и управления работой станка.

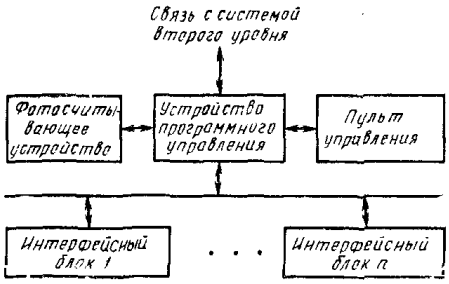


Рис. 7.2. Структурная схема локальной системы управления

Структура локальной системы управления обеспечивает адаптацию практически к любому типу сборочного технологического оборудования.

АСУ ТП участка сборки печатных плат является системой второго уровня. Она представляет собой центр, предназначенный для централизованного диспетчерского управления работой локальных систем управления, управления транспортной системой участка, автоматизации подготовки технологических программ, создания банка программ и данных участка, сбора диагностической информации и концентрации данных о работе сборочного участка для последующей передачи в АСУ более высокого уровня. Центр управления обеспечивает быструю и эффективную адаптацию участка к изменяющимся условиям производства.

Для сборки печатных плат каждого вида требуется своя технологическая программа, которая готовится автоматически в центре управления и затем передается в локальную систему управления конкретным сборочным оборудованием. Кроме того, центр управления оперативно вмешивается в работу транспортной системы участка, корректируя маршруты движения заготовок при изменении задания или состояния технологического оборудования. Вместе с тем полная автономность каждой локальной системы управления гарантирует высокую надежность сборочного участка в целом.

Все задачи, решаемые центром управления, можно разделить на три класса:

технологическая подготовка производства;

диспетчеризация участка;

контроль и диагностирование оборудования.

Задача технологической подготовки производства включает следующие подзадачи:

генерирование комплекта технологических программ (при этом в режиме диалога с оператором центр управления проверяет и редактирует всю информацию); автоматическая сортировка элементов по сборочным автоматам; оптимизация последовательности сборки; расчет производительности оборудования и выдача технологических программ на входном языке локальной системы управления;

организация долговременного хранения комплектов технологических программ в банке программ и обслуживание оператора при работе с банком;

организация долговременного хранения всей условно постоянной информации в справочнике центра управления и обеспечение управления справочником при его взаимодействии с оператором и внутренними подсистемами центра управления.

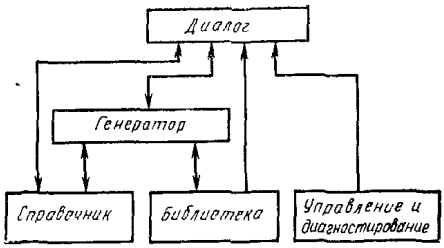


Рис. 7.3. Структура специального программного обеспечения

В комплекс задач диспетчеризации участка входят:

разработка оптимального графика работы оборудования;

формирование документов, регламентирующих загрузку сборочного технологического оборудования необходимыми элементами;

управление обслуживающим персоналом участка;

управление транспортной системой участка;

передача технологических программ локальной системе управления и диспетчерское управление этой системой в соответствии с графиком работы участка;

сбор и предварительная обработка технико-экономической информации, предназначенной для руководства участка и АСУ более высокого уровня.

При решении задач контроля и диагностирования центр управления выполняет следующие операции: выявляет отказавшие подсистемы; информирует оператора о сбоях и аварийных ситуациях; выдает рекомендации по устранению неисправностей и проводит административно-статистический учет их причин.

Система управления является обучаемой и при появлении нового оборудования допускает введение дополнительных диагностических алгоритмов.

Все программное обеспечение системы построено по модульному принципу, в соответствии с которым оно делится на компоненты, а те, в свою очередь, делятся на программные модули. Вызов модулей внутри компоненты осуществляется по методу Ашкрофта—Манны — через коммутатор модулей, который вызывает модули в заданной последовательности. Такая организация программного обеспечения позволяет использовать оверлейный режим работы (программно-организованная виртуальная память). Это экономит объем оперативной памяти, хотя время работы программ возрастает.

В состав программного обеспечения входят следующие компоненты: «Диалог»; «Генератор» (подготовка программ); «Библиотека»; «Справочник»; «Управление и диагностирование технологического оборудования».

Каждая из компонент является законченной программой, которая может работать самостоятельно. Структура специального программного обеспечения приведена на рис. 7.3.

«Диалог» является постоянной работающей программой и позволяет оператору вызывать компоненты программного обеспечения и задавать для их работы исходные данные.

«Справочник» хранит всю условно-постоянную информацию об используемых оборудовании и радиоэлементах. Посредством диалога с оператором информация в «Справочнике» может дополняться и корректироваться.

«Библиотека» хранит готовые технологические программы. По запросам программы «Управление и диагностирование» технологические программы передаются в программу «Библиотека» и далее в сборочное технологическое оборудование. Посредством диалога возможна коррекция библиотеки, ввод технологических программ и их вывод на внешние устройства ЭВМ.

«Генератор» составляет технологические программы на основе введенных в файл исходных данных, таблицы спецификаций и координат и помещает готовую технологическую программу в библиотеку.

Компонента «Управление и диагностирование технологического оборудования» передает технологические программы для сборочного технологического оборудования, следит за ходом их выполнения, выполняет команды оператора по изменению режима работы оборудования и передает оператору сообщения о неустранимых сбоях, а также оперативную информацию о ходе выполнения задания.

Центр управления реализован на мини-ЭВМ СМ-3 и обеспечивает управление группой сборочного оборудования (до 10 единиц). Описанный центр управления и локальная система управления являются основой для создания интегральных сборочных комплексов в производстве радиоэлектронной аппаратуры.

Под интегральным сборочным комплексом понимается система, состоящая из единого транспортного поля, исполнительных двухкоординатных приводов, специализированных манипуляторов, роботов-загрузчиков, автоматизированных бункерных кассет и системы управления. Такой комплекс выполняет все множество операций по сборке радиоэлектронной аппаратуры и при минимальных затратах на переналадку оборудования.

7.2. Сборочные роботы с силомоментным очувствлением

Автоматизация сборочных операций, в особенности в условиях мелко- и среднесерийного производства, является в настоящее время одним из основных направлений применения адаптивных роботов с силомоментным очувствлением.

Трудности на пути решения задачи автоматизации механической сборки с помощью адаптивных роботов связаны с наличием погрешностей относительного положения и ориентации собираемых деталей, значительно превышающих допуск. Эти погрешности обусловлены погрешностями позиционирования робота, а также неточностью установки объектов в фиксирующем устройстве и в захвате манипулятора. Суммарные погрешности относительного положения объектов могут достигать единиц миллиметров, в то время как допустимая погрешность позиционирования при сборке составляет в среднем 10—30 мкм. Погрешности позиционирования и ориентации собираемых деталей можно уменьшить путем применения различных механических направляющих и фиксаторов, однако при этом возрастает стоимость сборочного оборудования и снижается гибкость всей

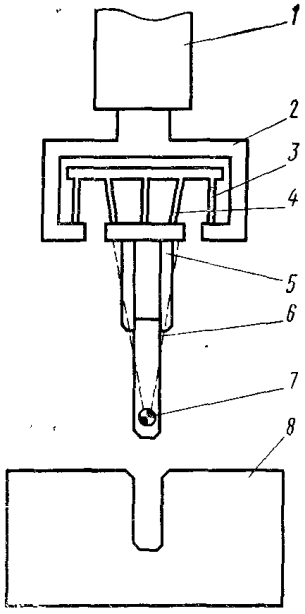


Рис. 7.4. Конструкция механического центрирующего устройства (МЦУ):

1 — последнее звено манипулятора; *2* — корпус МЦУ; *3* — упругие элементы МЦУ, обеспечивающие податливость по линейным координатам; *4* — упругие элементы МЦУ, обеспечивающие податливость по угловым координатам; *5* — захват; *6* — деталь типа вал; *7* — фокус МЦУ; *8* — деталь типа втулка

системы при переходе на выпуск новой продукции. Уменьшение погрешности позиционирования автоматических манипуляторов до 10—15 мкм — технически разрешимая задача, однако стоимость таких роботов будет значительной.

Компромиссное решение заключается в применении сборочных роботов, погрешность позиционирования захвата которых составляет ~0,1 мм, для сборки по жесткой программе широкой номенклатуры изделий с соизмеримыми допусками. Эти же роботы, оснащенные дополнительными устройствами для адаптации к погрешностям позиционирования объектов, могут быть использованы для прецизионной сборки изделий с относительными зазорами порядка 10 мкм.

Примерами автоматических манипуляторов, обладающих указанными характеристиками, могут служить отечественные роботы типа ПР4-1, роботы «Puma» фирмы «Юнимейшн» (США) и роботы типа «Pragma-A-3000» фирмы ДЭА (ФРГ).

Идея сопряжения деталей, например, вала и втулки, с относительным зазором порядка 10 мкм с помощью манипулятора, обеспечивающего погрешность позиционирования захвата не более 100 мкм, состоит либо в применении массивных механических центрирующих устройств, либо в использовании дополнительных обратных связей в системе управления робота от датчика вектора сил и моментов, действующих в точке контакта деталей. Хотя пассивный и активный способы адаптации служат одной и той же цели — компенсации погрешностей относительного линейного и углового расположения сопрягаемых деталей, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

Пассивные механические центрирующие устройства (МЦУ), устанавливаемые между последним звеном манипулятора и захватом (рис. 7.4), обладают податливостью по линейным и угловым координатам, что обеспечивает возможность смещения вала, зажатого в захвате, под действием сил и моментов, приложенных в точке контакта вала с втулкой. Особенностью МЦУ является то, что центр вращения вала относительно осей координат, связанных с захватом, располагается на торцовой поверхности вала, контактирующей с втулкой. Это обеспечивает наилучшие условия сопряжения деталей без возникновения заклинивания.

Основной недостаток применения механических центрирующих устройств, устанавливаемых на роботе, заключается в сложности

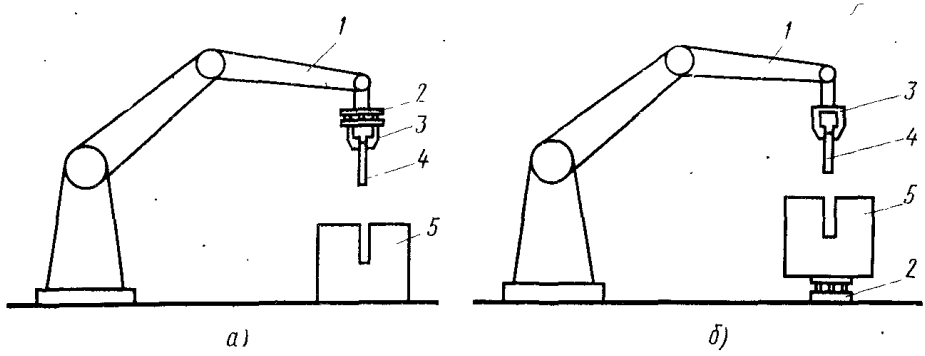


Рис. 7.5. Варианты размещения силомоментного датчика:
а — на кистевом звене манипулятора; *б* — в основании технологического стола; *1* — сборочный манипулятор; *2* — силомоментный датчик; *3* — захват; *4* — вал; *5* — втулка

перехода на сборку изделий другого типа, поскольку конструкция МЦУ в значительной степени зависит от вида сборочной операции и от размеров и массы сопрягаемых деталей.

Гораздо бо́льшими возможностями обладают перепрограммируемые сборочные манипуляторы, в которых в процессе управления движением используется информация о силах и моментах, возникающих при взаимодействии собираемых частей изделия. Активная адаптация к погрешностям позиционирования и ориентации деталей может быть реализована в сборочном роботизированном комплексе либо путем корректирующих движений приводов степеней подвижности самого манипулятора, либо путем перемещения группы приводов, скомпонованных в единый блок, который часто называют сборочным модулем.

Каждый из способов активной адаптации при сборке может иметь два конструктивных варианта реализации, отличающихся местом установки силомоментного датчика или сборочного модуля.

Размещение силомоментного датчика на кистевом звене сборочного манипулятора (рис. 7.5, *а*) позволяет создать универсальную конструкцию адаптивного робота, способного выполнять сборочные операции при любом варианте его установки (напольном, настенном или подвесном). Однако для манипуляторов со сложной кинематической схемой возникают значительные трудности в организации управления в реальном масштабе времени, так как в процессе корректирующих движений приводов необходимо многократно осуществлять преобразование информации о действующих силах и моментах, измеренных в системе координат захвата, в информации относительно базовой координатной системы, в которой формируются команды управления манипулятором. Поэтому на практике силомоментный датчик часто размещают отдельно от манипулятора в основании технологического стола, на котором устанавливается одна из сопрягаемых деталей (рис. 7.5, *б*). В этом случае силомоментный датчик формирует сигналы, характеризующие параметры силового взаимодействия деталей относительно неподвижной декартовой системы координат, что упрощает процедуру сопряжения датчика

с системой управления робота. Эта конструктивная схема обеспечивает также динамическую развязку манипулятора и датчика и таким образом исключает появление помех на выходе силомоментного датчика, вызванных колебаниями захвата с грузом.

Общий недостаток рассматриваемых вариантов активной адаптации к погрешностям позиционирования собираемых деталей заключается в сложности одновременного выполнения требований заданной динамики движения и статической точности манипулятора в процессе транспортных перемещений и требований, предъявляемых к конечной фазе — выполнению сборочной операции, характеризуемой микроперемещениями сопрягаемых деталей и точным контролем действующих сил и моментов. Поэтому в ряде конструкций сборочных роботов задачи транспортного перемещения деталей и точного их сопряжения с использованием информации о силах и моментах, действующих в точке контакта, решены с помощью различных устройств: транспортные перемещения выполняются промышленным роботом, а адаптивная коррекция положения деталей осуществляется сборочным модулем, оснащенным силомоментным датчиком. Сборочный модуль может быть установлен как на самом роботе вместо его последнего звена или захвата, так и отдельно от него.

Количество преобразований координат, осуществляемых в процессе управления в рассматриваемом случае, определяется только кинематикой самого сборочного модуля и не зависит от места его установки. Кроме того, разделение функций транспортного переноса деталей и их точного позиционирования и ориентации при сборке позволяет независимо от размеров и массы изделий оптимизировать обе эти фазы движения одновременно. При этом допускаются значительные начальные смещения деталей относительно друг друга (до единиц миллиметров), а контактные силы и моменты могут быть ограничены любым заданным произвольно малым значением, что обеспечивает сборку хрупких и легко повреждаемых изделий.

Наиболее удобной схемой исследовательской установки для изучения процессов механической сборки принято считать схему комплекса сборочный модуль — промышленный робот. Она имеет целый ряд практических преимуществ. Во-первых, на основе такого комплекса могут быть исследованы любые из рассмотренных выше типов принципы адаптации к начальному смещению деталей. Во-вторых, отсутствуют какие-либо ограничения, налагаемые кинематикой конкретного сборочного манипулятора при цифровом управлении сборкой в реальном масштабе времени, так как сборочный модуль обычно строится по простейшей кинематической схеме и часто с взаимно ортогональными осями движения приводов. В-третьих, экспериментальная конструкция сборочного модуля может послужить прообразом реального устройства, устанавливаемого на кистевом звене робота.

Адаптивный сборочный модуль включает основание, несущую стойку и кронштейн, на котором установлена каретка с двумя степенями подвижности, обеспечивающая возможность перемещения

по двум взаимно ортогональным координатам в горизонтальной плоскости, а также механизм вертикального перемещения захвата. Каждая из трех степеней подвижности модуля обеспечивается позиционным следящим электромеханическим приводом на основе двигателей постоянного тока независимого возбуждения типа ДПМ-30. Для измерения контактных сил в процессе сборки на кистевом звене установлен трехкомпонентный силомоментный датчик.

Сборочный модуль имеет следующие технические характеристики:

Точность позиционирования по координатам, мм	±0,1
Погрешность линейности перемещения, %	1
Размеры рабочей зоны, мм:	
по горизонтали	30×30
по вертикали	70
Максимальная скорость перемещения, мм/с	40
Время переходного процесса по координатам X и Y, с	0,2

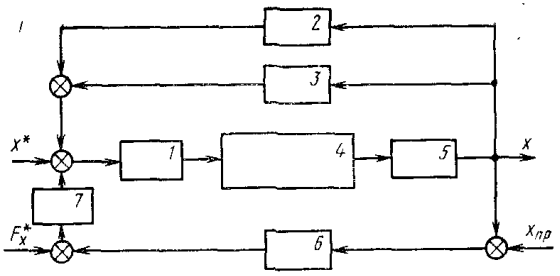
Последовательность работы сборочного комплекса следующая. С помощью электромеханического робота УЭМ-2 осуществляется перенос одной из сопрягаемых деталей, например, втулки, в заданную точку рабочей зоны адаптивного сборочного модуля и ее фиксация на установочной поверхности. Другая деталь, например, вал, захватывается из накопителя сборочным модулем и подается с помощью горизонтальных приводов к предполагаемому месту нахождения втулки. В момент касания сопрягаемых деталей по образующей фасочной поверхности возникает сила реакции связи, модуль и направление которой зависят от значения и знака рассогласования осей соединяемых деталей в принятой системе координат. При погрешностях центрирования, не превышающих половину диаметра вала, сила реакции направлена к предполагаемому центру соосности двух деталей. Ее составляющие выделяются силомоментным датчиком и подаются на соответствующие входы следящих приводов таким образом, что результатом их действия является коррекция положения двигателей в сторону уменьшения рассогласования осей деталей.

Корректирующие движения приводов в горизонтальной плоскости осуществляются в процессе непрерывного перемещения вала с постоянной скоростью по вертикали до тех пор, пока вертикальная сила реакции не превысит предельное значение или пока вал не будет установлен на заданную глубину.

Допустимые контактные силы могут быть ограничены на любом желаемом уровне путем задания установок на соответствующих входах системы управления приводами (рис. 7.6).

Особенностью системы управления сборочного модуля является наличие дополнительной петли силовой обратной связи, включенной параллельно главной обратной связи по положению привода. Это позволяет активно управлять контактными силами без заклинивания деталей.

В процессе экспериментального исследования технологических возможностей разработанного сборочного комплекса проводилась



ис. 7.6. Функциональная схема дного канала системы управления привода сборочного модуля:

** — входная координата положения привода; x — выходная координата привода; $x_{пр}$ — координата препятствия; F_x^* — заданное силовое воздействие по координате x; *1* — блок коррекции канала управления положением; *2* — датчик положения; *3* — тахогенератор; *4* — электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения; *5* — винтовой преобразователь; *6* — силомоментный датчик; *7* — блок коррекции канала управления силовым воздействием

сборка деталей типа вал—втулка диаметром 10—60 мм с гарантированным зазором ~20 мкм при относительных погрешностях позиционирования 0—3 мм. Во всех сериях экспериментов сборка выполнялась надежно без заклинивания даже при заданном начальном угловом рассогласовании осей деталей до 5°. Эта угловая погрешность компенсировалась за счет податливости конструкции силомоментного датчика.

В результате проведения дополнительной серии экспериментов по механической сборке элементов гидродвигателя диаметром около 10 мм при относительных зазорах 7—10 мкм с помощью сборочного модуля, имеющего собственную погрешность позиционирования захвата, равную 0,1 мм, было показано, что стратегия адаптивного управления с использованием обратных связей по силам и моментам, действующим в точке контакта деталей, является эффективным инструментом выполнения высокоточной сборки.

Преимущества адаптивных сборочных модулей как дополнительных устройств, расширяющих функциональные возможности промышленных роботов, наиболее наглядно проявляются при коррекции больших начальных позиционных погрешностей собираемых деталей, при которых пассивные механические центрирующие устройства оказываются неработоспособными.

Несомненно, что активные средства адаптации типа сборочных модулей совместно с промышленными роботами окажутся эффективным средством автоматизации мелко- и среднесерийного сборочного производства.

7.3. Пример робототехнической системы для многооперационной сборки

Возможность выполнения сложной последовательности сборочных операций с помощью универсальных манипуляторов, снабженных простейшими датчиками, при управлении от мини-ЭВМ, обеспечивающей программную адаптацию сборочного процесса и достижение существенно большей точности сопряжения деталей по сравнению с точностью при неадаптивном управлении, показана на примере

автоматической сборочной системы (АСС), разработанной в ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР.

Техническую основу системы составляют два электромеханических манипулятора УЭМ-2, каждый из которых имеет шесть степеней подвижности (и седьмую в захвате). Манипуляторы подключены к мини-ЭВМ М-6000. Показания потенциометрических датчиков положения степеней подвижности манипуляторов вводятся в ЭВМ через 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь. Контур управления двигателями манипуляторов замыкается через ЭВМ, которая с частотой около 30 Гц изменяет через специальный интерфейс параметры управления двигателями.

Захваты робота оснащены датчиками, обеспечивающими силовое очувствление. Кроме того, к роботу может быть подсоединена система технического зрения.

Планирование сборки проводится на трех уровнях. Для этого составляют:

1. План сборки в целом, в котором задается последовательность выполнения сборочных операций, а также реакция на неверно выполненные операции.

2. План каждой сборочной операции, в котором указывается последовательность движений манипуляторов, необходимых для выполнения операции, описываются условия, при выполнении которых можно переходить от одного движения к другому. Помимо этого, в плане операции указывается реакция на неверно выполненные движения.

3. Программу всех движений, указанных в планах сборочных операций. Движения могут быть заданы, в частности, путем «хореографического» программирования, т. е. путем последовательного вывода манипуляторов (вручную или с помощью специального выносного пульта) в те положения, через которые они должны проходить.

Программа автоматической сборки структурно состоит из двух процессов. Первый процесс — основной — это следящая система. Этот процесс запускается по прерыванию от таймера с частотой около 30 Гц и осуществляет опрос показаний датчиков, контроль за состоянием устройств и выдает на двигатели управления, необходимые для отслеживания заданного программного движения. Второй процесс — фоновый. Он использует время, остающееся от первого процесса. В этом процессе происходит просмотр плана сборки и планов сборочных операций, подготовка к исполнению требуемых движений, запуск их на исполнение в основном процессе, а также проверка выполнения условий, определяющих переход от одного движения к другому.

Наиболее важные принципы организации автоматической сборки были основаны на следующих положениях. Для точного позиционирования деталей служат упоры, в качестве которых используются и сами сопрягаемые детали. В процессе сборки детали, установленные за i первых шагов, могут служить упорами, направляющими движение детали, устанавливаемой на $(i + 1)$-м шаге. На первом

шаге сборки могут быть использованы упоры сборочного приспособления, например, угол или стенка. На втором шаге основание служит упором при установке, например, оси зубчатого колеса в отверстие основания.

Назовем податливостью свойство манипулятора изменять свою конфигурацию не только за счет усилий двигателей, но и под влиянием внешних воздействий. Противоположное свойство назовем жесткостью. Податливость позволяет использовать достаточно грубые (упрощенные) программные движения при перемещении предметов, ограниченных связями, снижает требование к точности управления. Податливость, в частности, обеспечивает возможность точного позиционирования деталей по упорам при наличии погрешностей в исполнении манипуляционных движений.

Податливость системы обеспечивалась конструкцией пальцев захвата правой руки, допускающей упругие перемещения вдоль своей продольной оси. Кроме того, она обеспечивалась за счет упругости резиновых накладок, предусмотренных на внутренних сторонах пальцев захватов обеих рук, а также за счет зазоров в сочленениях звеньев манипуляторов и их упругости.

Одной из главных задач, решаемых датчиками очувствления робота, является обнаружение момента выхода объекта на упор.

На захвате правой руки сборочного робота установлены датчики измерения линейных перемещений подпружиненных пальцев. Это позволяет измерять усилия, действующие вдоль продольной оси пальцев. Пальцы захвата левой руки снабжены тактильными датчиками, обнаруживающими, что захват сжал предмет. Выход на упор может быть также обнаружен на основании показаний потенциометрических датчиков положения звеньев манипуляторов. Если показание какого-либо датчика не меняется с течением времени, а на соответствующий двигатель выдается определенное управление, то это обстоятельство можно интерпретировать как выход объекта на упор. Таким образом, робот, оснащенный только датчиками положения звеньев манипулятора, оказывается в достаточной степени очувствленным и способным на адаптивное поведение при наличии развитого управления.

Неточности манипулятора компенсировались специальными поисковыми движениями, представляющими собой колебания захвата с малой амплитудой (1—2 см) в окрестности целевой точки.

При установке оси зубчатого колеса в отверстие захват с зажатой деталью выводится в окрестность отверстия и начинает совершать небольшие колебательные движения, одновременно слегка прижимая торец оси зубчатого колеса к поверхности основания. Если погрешность вывода в окрестность отверстия не слишком велика, то благодаря таким поисковым движениям ось зубчатого колеса довольно быстро попадает в отверстие. Край отверстия в этом случае служит упором для оси зубчатого колеса. Для упрощения и ускорения сборки использовались простые приспособления и инструменты — аналоги ручных инструментов, которыми пользуется человек во время сборки, — тиски, гайковерты. отвертки и т. п.

Наличие у робота двух манипуляторов сильно снижает требования к необходимому числу фиксирующих вспомогательных приспособлений.

Движения манипуляторов при выполнении сборочных операций могут быть достаточно сложными. Поэтому в системе необходима управляющая ЭВМ, использование которой обеспечивает требуемую простоту и гибкость при организации специализированных движений и позволяет легко изменять сам процесс сборки. Система управления рассматриваемого сборочного робота реализована на мини-ЭВМ М-6000.

Сборка представляет собой последовательность специализированных движений манипуляторов робота — транспортных, поисковых, тестирующих и т. д. Используя простейшее очувствление робота, система управления параллельно с исполнением каждого движения анализирует текущую ситуацию и при выполнении заданных условий организует окончание данного движения и переход к некоторому другому.

При этом использование ЭВМ в системе управления сборочного робота позволяет оценивать текущую ситуацию по любым комбинациям показаний датчиков очувствления.

Установка оси зубчатого колеса в отверстие основания масляного насоса происходила успешно практически всегда и занимала около 2 с. Это время зависело от разброса в положении отверстия в пределах 1 см во всех направлениях. Зазор между осью колеса и стенкой отверстия составлял около 30 мкм, а погрешность позиционирования используемых в автоматической сборочной системе манипуляторов составляет приблизительно 5 мм. В таких условиях сборка становится возможной только за счет взаимодействия сопрягаемых поверхностей деталей и использования их в качестве упоров и направляющих, а также за счет податливости захватов, которая компенсирует погрешности движения манипуляторов.

Повышение точности манипуляторов позволяет значительно ускорить сборку. Однако увеличение точности (и жесткости) универсальных манипуляторов выше некоторого предела делает их дорогостоящими и громоздкими. Поэтому автоматизация сборочных операций с помощью манипуляторов, точность которых существенно меньше требуемой точности сопряжения деталей, безусловно представляет интерес.

Для ввода информации в управляющую ЭВМ в автоматизированной сборочной системе предусмотрены развитые диалоговые средства. В качестве операторского терминала используется алфавитно-цифровой дисплей «Видеотон-340».

При задании необходимых движений может быть использовано программирование, при котором манипуляторы последовательно выводятся в нужные положения (вручную или с помощью специального выносного пульта), а управляющая ЭВМ автоматически запоминает данные точки позиционирования. Возможность вводить информацию не только в текстовой форме, но и путем непосредственного обучения необходимым движениям упрощает общение оператора с ЭВМ и

приводит к повышению пропускной способности и надежности связывающего их канала.

План сборки в целом, планы сборочных операций и описания необходимых движений реализованы в виде ориентированных графов и могут задаваться в произвольном порядке. Другими словами, оператор может ввести программирование «сверху вниз», или «снизу вверх», или любым удобным для него способом. Имеется возможность накапливать вводимую информацию в архиве, где она будет храниться и откуда может быть снова извлечена (для этого используется магнитный диск ЕС 5050). После того как вся информация введена в ЭВМ, система оказывается способной выполнить автоматическую сборку.

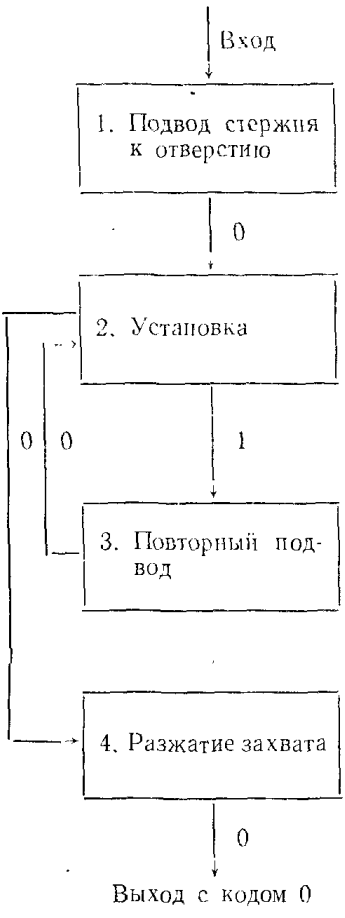
Автоматическая сборочная система представляет собой простые и гибкие средства для организации самых разнообразных специализированных движений, которые требуются при выполнении сборки. Эти движения могут быть медленными и быстрыми, точными и грубыми, колебательными, силовыми, прерываемыми в зависимости от любых комбинаций показаний датчиков очувствления. Программные средства системы включают ряд подсистем, обеспечивающих управление роботом в основном рабочем режиме (режиме автоматической сборки), а также предоставляющих возможность оператору-программисту выполнять предварительное планирование работы робота. В состав основных программ входят следующие пять подсистем для задания и редактирования: 1) плана сборки; 2) планов сборочных операций; 3) планов условий; 4) контуров движений; 5) коэффициентов следящей системы, а также подсистема управления автоматической сборкой.

Загрузка каждой из указанных подсистем, а также требуемых файлов данных в память ЭВМ осуществляется с магнитного диска в рамках дисковой операционной системы. Первые пять подсистем работают на этапе планирования сборки оператором-программистом. Шестая подсистема осуществляет управление автоматической сборкой.

В качестве примера, иллюстрирующего работу программы управления, рассмотрим операцию NO1 установки стержня в отверстие. Будем считать, что стержень уже зажат в захвате манипулятора и что отверстие представляет собой вертикальный канал в детали, ограниченной горизонтальными плоскостями.

План сборочной операции показан на рис. 7.7. Будем считать, что стержень устанавливается в отверстие правой рукой, т. е. типы контуров всех движений, участвующих в операции NO1, определяют в качестве задействованных только степени подвижности правой руки.

Работа с системой начинается с того, что интерпретатор во втором (фоновом) процессе выбирает из плана сборки операции описание движения (обозначенное *NKD1*) подвода стержня к отверстию и запускает его на исполнение в первом процессе. В результате выполнения этого движения стержень перемещается в окрестность отверстия, а его ось ориентируется вертикально. Условием NC1,



Контур движения — *NKD1*
Способ движения — контурный
Тип движения — для всех степеней подвижности основной режим отслеживания
Тип начала движения — для всех степеней подвижности абсолютный способ задания начального значения параметров положения манипулятора
Номер условия — *NC1*

Контур движения — *NKD2*
Способ движения — контурный
Тип движения: для 1, 2, 6-й степеней подвижности — основной режим отслеживания; для 3-й — силовое воздействие; для 4, 5-й — колебания
Тип начала движения — для всех степеней подвижности абсолютный способ задания
Номер условия — *NC2*

Контур движения — *NKD3*
Способ движения — контурный
Тип движения — для всех степеней подвижности основной режим отслеживания
Тип начала движения — для всех степеней подвижности абсолютный способ задания
Номер условия — *NC1*

Контур движения — *NKD4*
Способ движения — позиционный
Тип движения — для всех степеней подвижности основной режим отслеживания
Тип начала движения — для всех степеней подвижности абсолютный способ задания
Номер условия — *NC3*

Рис. 7.7. План сборочной операции

приписанным данному движению, является выход манипулятора в требуемую конфигурацию с заданной точностью. В то время как в первом процессе исполняется движение подвода, во втором процессе осуществляется циклическая проверка отклонения текущей конфигурации манипулятора от требуемой. Эта проверка осуществляется с помощью потенциометрических датчиков положения звеньев манипулятора. Если отклонение становится больше допустимого, то движение подвода считается законченным, проверка условия прекращается и вырабатывается код ответа 0.

После этого в соответствии с планом сборочной операции второй процесс запускает исполнение движения, обеспечивающего установку *NKD2*. Это движение заключается в том, что торец стержня слегка прижимается к горизонтальной плоскости детали и осуществляются небольшие колебания стержня во всех направлениях в этой плоскости. Вначале за счет податливости захвата стержень находится в постоянном контакте с горизонтальной плоскостью детали. Но с момента зацепления стержня за край отверстия он

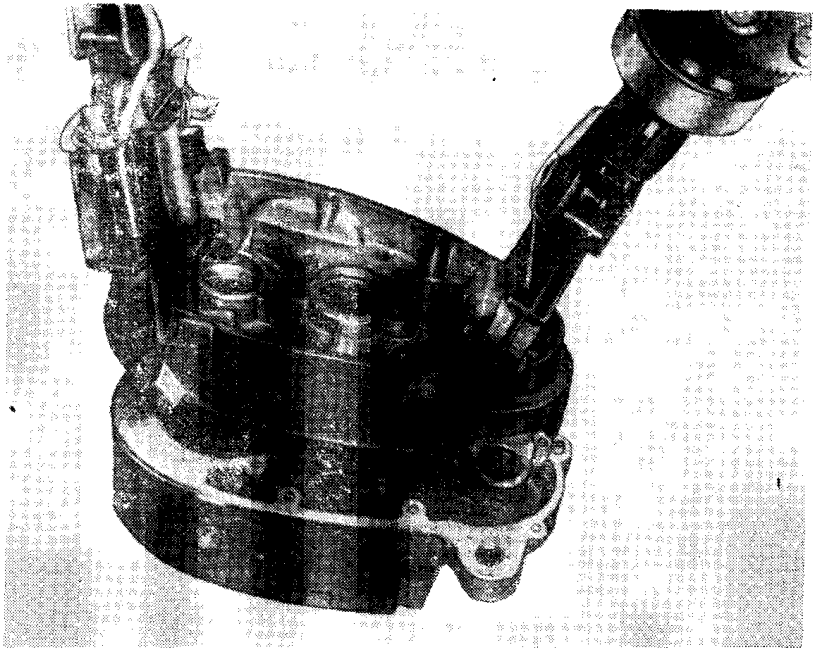


Рис. 7.8. Сборка масляного насоса

начинает проваливаться в отверстие за счет поджатия, а также за счет продолжающихся колебаний. При этом внутренняя поверхность отверстия служит направляющей для стержня.

В то время как в первом процессе осуществляется движение установки, во втором процессе происходит проверка условия *NC2*, приписанного данному движению. В цикле проверяется, произошли ли некоторые события, связанные с попаданием стержня в отверстие. Как только стержень попадет в отверстие, захват манипулятора опустится в вертикальном направлении на длину стержня, вставляемого в отверстие. Кроме того, реальная амплитуда колебаний захвата манипулятора резко уменьшится (так как находящийся в отверстии стержень будет тормозить его движение). Эти события можно установить по показаниям потенциометрических датчиков положения звеньев манипулятора. Если указанные события не наступили, то проверка повторяется, если же события совершились, то движение установки считается законченным, проверка условия прекращается и вырабатывается код ответа 0.

В этом цикле проверяется также время, затрачиваемое на установку стержня. Представляется естественным ожидать наступления событий, связанных с попаданием стержня в отверстие, не сколь угодно долго, а по истечении заданного интервала времени. Если за указанное время стержень не попал в отверстие (например, вследствие заклинивания), то движение *NKD2* считается неудавшимся, проверка условия прекращается и вырабатывается код ответа 1.

После прекращения движения *NKD2* второй процесс запускает или движение *NKD3* повторного подвода стержня к отверстию, или движение *NKD4* разжатия захвата. Вершина *4* в плане сборочной операции является конечной (см. рис. 7.7).

При завершении исполнения сборочной операции *NO1* интерпретатор во втором процессе пытается выбрать из плана сборки очередную операцию, убеждается, что ее нет, и заканчивает сборку.

Длительность такта управления в системе составляет 33 мс. С этой частотой происходит опрос датчиков робота и изменяются значения управлений на его двигателях.

Непрерывно происходит или интерпретация плана сборки и планов сборочных операций, или проверка условий, приписанных движениям. Эти действия заканчиваются только тогда, когда кончается сборка.

При проведении экспериментов было выполнено планирование сборки масляного насоса, и в память управляющей ЭВМ была введена соответствующая информация — план сборки, планы сборочных операций, а также описания необходимых движений. Характеристики этой информации, позволяющие составить представление о том, какие данные и в каком объеме требуются для описания сборки, приведены ниже.

Число вершин в плане сборки	20 (одна вершина — выходная)
» сборочных операций	10
» вершин в планах сборочных операций . .	68 (10 вершин — выходных)
» узловых точек во всех контурах движений	404
» вершин в планах условий	86 (23 вершины — выходные)
» элементарных условий	21

Далее проводились пооперационные и сквозные процессы сборки, в течение которых подбирались значения времени, отводимого на исполнение различных контуров движения, а также параметры условий. Значения времени выбирались так, чтобы по возможности ускорить сборку при сохранении ее стабильности, а параметры условий — с таким расчетом, чтобы обеспечить надежный контроль за правильностью исполнения различных действий. Общее время сборки масляного насоса составило 4 мин 17 с.

Проведенные эксперименты показывают, что применение ЭВМ в контуре управления сборочного робота позволяет осуществлять достаточно большую последовательность разнородных сборочных

операций при весьма ограниченной точности позиционирования манипуляторов и использовании небольшого числа простейших приспособлений. Свойственная ЭВМ способность выполнения логических операций и ветвления процесса управления дает возможность удобно и гибко сочетать технологические и контрольные операции, варьировать их в зависимости от складывающейся фактической ситуации, что позволяет повысить надежность сборочного процесса, обеспечить успешное протекание сборки при наличии некоторых неточностей позиционирования деталей, ошибок или помех.

Адаптивное поведение автоматической системы при сборке масляного насоса (рис. 7.8) было обеспечено на основе использования потенциометрических датчиков положения звеньев манипуляторов без применения систем силомоментного очувствления или технического зрения.

Глава 8 АДАПТИВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

8.1. Адаптивные роботы для участков механической обработки

Робототехнические комплексы для механической обработки включают основное программно-управляемое оборудование (металлорежущие станки, прессы, штампы и т. п.), роботы, а также конвейеры, магазины, тару и т. п. При этом роботы служат в первую очередь для автоматизации вспомогательных операций по установке, перемещению и снятию заготовок. В ряде случаев на них возлагают и некоторые технологические операции, например, резку лазером, снятие фасок, сверление, нарезание резьбы, ковку, шлифование и полирование. Качественное выполнение всех этих операций возможно лишь при использовании адаптивных роботов.

При создании робототехнических комплексов на базе металлорежущих станков предпочтение отдается станкам с числовым программным управлением (ЧПУ) и обрабатывающими центрами. Преимущество таких станков по сравнению со специализированными станками-автоматами заключается в их универсальности: простой заменой программы резания станок с ЧПУ перестраивается на новый тип операций или режим работы. Однако слабым местом станков с ЧПУ до последнего времени оставалась необходимость ручного труда при установке заготовки, смене режущего инструмента и съеме готовой детали.

В настоящее время появились новые станки и обрабатывающие центры, сочетающие станок с ЧПУ с одним или несколькими автоматическими манипуляторами. Примером таких комплексов является робототехнический комплекс для токарной обработки фирмы «Бош» (ФРГ), представленный на рис. 8.1.

Изменчивость производственных условий, неизбежные на практике возмущения и помехи обусловливают необходимость гибкой приспособляемости робототехнических комплексов, а также адаптивности как основного технологического оборудования, так и обслуживающих его роботов. Следует указать, что элементы адаптации появились в металлорежущих станках задолго до внедрения ЧПУ и роботов. Известны отечественные системы регулирования скорости резания в зависимости от температуры резца и упругих деформаций станка.

В современных станках с ЧПУ средства адаптации используются для автоматической коррекции и оптимизации режимов обработки (подачи, скорости) в зависимости от заранее неизвестной фактиче-

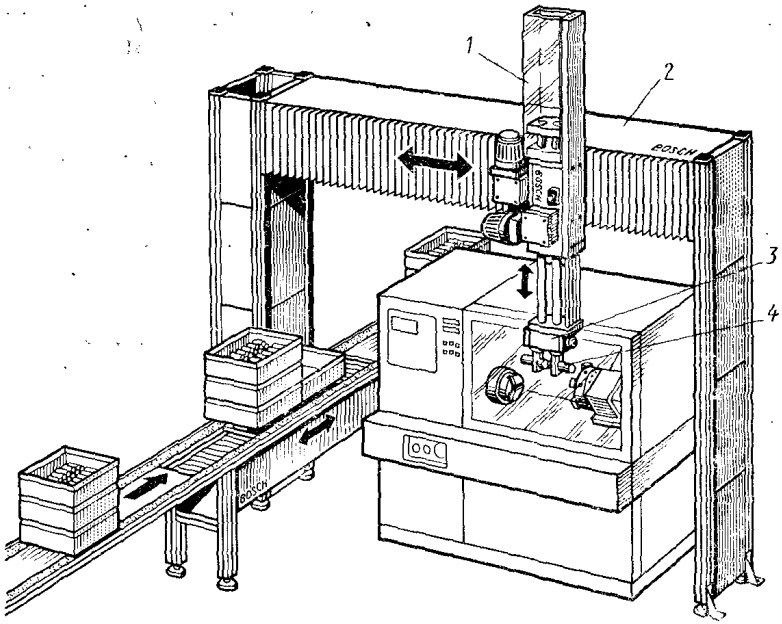


Рис. 8.1. Модульный робот фирмы «Бош» для обслуживания токарного станка с ЧПУ: *1* — линейный блок грузоподъемностью до 20 кг; *2* — унифицированная каретка грузоподъемностью до 200 кг; *3* — ротационный блок захвата (прицепной груз массой до 20 кг); *4* — захват

ской нагрузки на шпинделе, от износа инструмента или дрейфа параметров. Это позволяет повысить производительность механической обработки (до 40 %), предотвратить поломку инструмента, значительно повысить качество обработки и сократить затраты на программирование.

Принцип ЧПУ получил наибольшее применение при разработке металлорежущих станков. Главное преимущество станков с ЧПУ заключается в их гибкости, т. е. возможности без переделок оборудования быстро перестраиваться на новые технологические операции и режимы. Это достигается за счет автоматического перепрограммирования (самопрограммирования) движений рабочего инструмента. Необходимость в таком перепрограммировании возникает, например, тогда, когда вследствие изнашивания инструмента точность обработки начинает выходить за установленные допуски.

Таким образом, автоматическое перепрограммирование открывает возможность адаптации на уровне программатора, реализующего ЧПУ оборудования. Для автоматизации программирования станков разработаны специальные проблемно-ориентированные языки. Эти языки содержат средства для описания объектов и обозначения действий (операций) над этими объектами. Общей чертой всех входных языков ЧПУ является то, что в качестве объектов в них выступают обрабатываемые детали на разных стадиях обработки, а также инструменты различных типов (резцы, фрезы, сверла и т. п.). В набор команд языка входят перемещения и повороты вокруг осей

координат, изменения скорости обработки, подача и т. д. Для задания типа и режима обработки используются специальные операторы. Так, для ЧПУ фрезерных станков часто употребляется оператор ИДИ, после которого следует список элементов пути, который нужно пройти фрезе. Например, запись ФР ИДИ/ОКР1, ПР2 до ТЧК3 означает, что фреза должна пройти дугу окружности 1, отрезок прямой 2 до точки 3.

В СССР для самопрограммирования фрезерных станков с ЧПУ разработаны языки СПС-Т, СПС-ТАУ и др. Использование этих языков позволяет сократить трудоемкость программирования в 10—20 раз, а стоимость в 5—15 раз.

Следует заметить, что оптимизация режимов обработки с учетом технологических ограничений (по точности, скорости и т. п.) является предметом технологического проектирования и требует разработки специальных алгоритмов расчета оптимальных (например, по быстродействию) программ движения.

Значительный интерес представляет концепция программирования токарных станков с ЧПУ, суть которой заключается в том, что программирование тел вращения и технологических режимов их обработки осуществляется непосредственно с рабочего чертежа в режиме диалога на языке пользователя с отображением технологической карты обработки на дисплее. При этом отпадает необходимость в языках программирования, для использования которых требуются специальные знания и навыки.

При автоматической установке заготовки на каждом станке с ЧПУ необходимо, чтобы погрешность не превышала допуск. Традиционное (неадаптивное) решение проблемы сводится к изготовлению и использованию специальных приспособлений-спутников (палет) и конвейеров для их перемещения между станками. Это требует значительных затрат и дополнительного оборудования. Другое решение, свободное от указанных недостатков, основано на использовании адаптивных роботов со станками с ЧПУ.

Точность позиционирования и ориентации объектов можно повысить также за счет организации поисковых микродвижений манипулятора. Эти функции возлагаются на адаптивную систему управления, которая в этом случае использует логическую обратную связь, т. е. набор условных переходов в зависимости от сигналов с датчиков обратной связи. Если в качестве датчиков используется система технического зрения, то адаптивная система самопрограммирования движений обеспечивает автоматический обход препятствий и точное наведение захвата манипулятора.

Использование адаптивных роботов в робототехнических комплексах для механической обработки дает значительный технико-экономический и социальный эффект. Для оценки этого эффекта применяют различные критерии. Обычно считают, что один робот заменяет одного—трех станочников. В среднем обработка заготовок на металлорежущих станках занимает 5 % общего времени. Остальное время расходуется на установку и снятие заготовки, смену инструмента, транспортировку, складирование, уборку стружки

Таблица 8.1

Вариант организации работы	Число		Расходы на			Показатель		Экономический эффект ($Э = П/Р$)
	станков	операторов	оборудование	заработную плату	эксплуатацию	годовых расходов ($Р$)	производительности ($П$)	
			млн. иен (%)					
Станки-полуавтоматы		5	14,50 (1,00)	28,80 (2,00)	3,442 (0,24)	1	1	1
Станки с ЧПУ	5	3	29,40 (2,00)	17,28 (1,20)	5,688 (0,39)	0,71	3	4,2
Станки с ЧПУ и робот		2	45,90 (3,15)	11,52 (0,80)	9,337 (0,65)	0,65	3,5	5,4

и т. п. Отсюда видны большие резервы повышения эффективности механической обработки.

Применение адаптивных роботов позволяет уменьшить непроизводительные затраты времени, повысить коэффициент использования дорогостоящего оборудования и увеличить отношение объема производства к общим затратам на него. Сравнительные экономические данные для трех вариантов организации работы представлены в табл. 8.1.

Эффективность применения роботов существенно зависит от того, в каком режиме их эксплуатируют. Так, при использовании роботов в три смены себестоимость изготовления одной детали снижается в среднем в 2 раза по сравнению с себестоимостью в режиме односменной эксплуатации.

8.2. Адаптивные роботы для участков штамповки

На участках штамповки при частых переналадках для выпуска новых деталей необходимо не только перенастраивать роботы, но и оснащать их комплексами дополнительного вспомогательного технологического оборудования. Решению этой проблемы способствует использование адаптивных промышленных роботов, приспосабливающихся к изменениям формы и ориентации разнообразных заготовок для штамповки.

В функции адаптивного робота входит определение класса транспортируемой конвейером детали, ее ориентация, а затем захватывание и транспортирование в требуемое положение. Часто в таких роботах используют системы технического зрения.

Однако в ряде практически важных случаев адаптивные роботы могут быть реализованы с незначительными затратами на адаптацию, как это показано на рис. 8.2.

На этапе обучения оператор с пульта управления *19* вносит в блок памяти *18* информацию о коде сигналов блока фотодатчиков

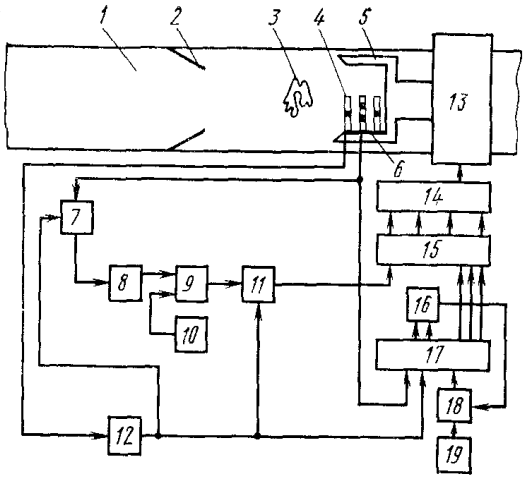


Рис. 8.2. Структурная схема адаптивного робота на участке штамповки

для каждого фиксированного положения детали *3*, угле поворота и горизонтальном перемещении захвата *5*, соответствующем данному коду, а затем переключает пульт управления в рабочий режим.

Деталь, перемещаемая лентой конвейера *1*, направляющими *2* смещается к центру ленты, степень раскрытия направляющих регулируется и устанавливается равной раскрытию захвата. Деталь, достигая задней стенки захвата, под действием сил трения начинает разворачиваться и занимает одно из 10 возможных устойчивых положений (рис. 8.3). В исходном состоянии захват находится в центре конвейера и примыкает к нему. При попадании детали в зону действия блока фотодатчиков *6* на выходе схемы *8* анализа нуля появляется сигнал «1», который подается на первый вход схемы И *9* (см. рис. 8.2). Импульсы с выхода генератора тактовых импульсов *10* начинают поступать на счетный вход счетчика импульсов *11*. Коэффициент счета счетчика импульсов выбирают из условия обеспечения задержки, необходимой для того, чтобы деталь в захвате успела принять одно из фиксированных положений. После переполнения счетчика на первый вход блока электронных коммутаторов *15* подается сигнал «1». С первого выхода этого блока сигнал поступает на первый вход блока *14* управляющих обмоток, выхода которого подается сигнал на сжатие захвата.

Для обеспечения определенного усилия сжатия захват снабжен датчиком усилия. Сигнал датчика *4* подается на пороговый элемент *12*, на выходе которого появляется сигнал «1», но лишь после достижения заданного усилия сжатия захвата. С выхода порогового элемента *12* сигнал поступает на коммутатор *7*. Последний отключает схему *8* анализа от блока фотодатчиков *6*. Импульсы с генератора тактовых импульсов перестают поступать на счетный вход счетчиков импульсов *11*. Этим же сигналом с порогового элемента сбрасывается до нуля счетчик импульсов *11*, и через второй вход блока логических элементов И *17* на третий и четвертый входы блока электронных коммутаторов подается сигнал. По этому сигналу блок электронных коммутаторов *15* вырабатывает сигналы, которые поступают на входы управляющих обмоток приводов манипулятора. На выходе блока управляющих обмоток появляется сигнал о прекращении сжатия захвата, перемещениях по вертикали, горизонтали и ротации захвата. По этому же сигналу порогового элемента *12* считывается код с блока фотодатчиков.

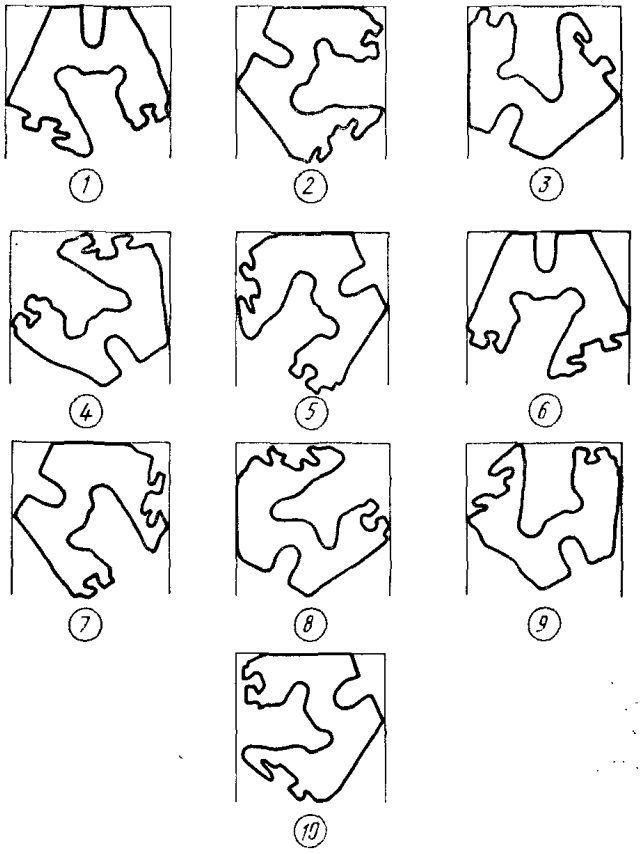


Рис. 8.3. Варианты положения детали в захвате

Считанный код через первый вход блока логических элементов И *17* поступает на первый вход схемы сравнения *16*. С выхода блока памяти *18* через третий вход блока логических элементов *17* на второй вход схемы сравнения *16* поступают коды, записанные в блоке памяти *18* на этапе обучения. При равенстве кодов на выходе схемы сравнения *16* появляется сигнал, по которому из блока памяти *18* считываются сигналы угла поворота захвата, ротации колонны и горизонтального перемещения захвата, которые через четвертый и пятый выходы блока *17*, блок электронных коммутаторов *15* и блок *14* управления обмоток поступают на приводы манипулятора *13*.

Положения датчиков адаптации и их число, необходимое и достаточное для определения типоразмера и ориентации заготовки в захвате, выбирают следующим образом. Пусть адаптивный робот предназначен для работы с s заготовками, каждая из которых может занимать в захвате p_i положений, где $i = 1, \ldots, s$. Тогда общее число возможных положений заготовок в захвате $p = \sum_{i=1}^{s} p_i$. Можно наложить изображения s заготовок во всех p положениях друг на друга и отметить возможные места установки датчиков для детали

типа скоба. Пусть все датчики являются двоичными. Тогда сигнал h_k на выходе k-го датчика

$$h_k = \begin{cases} 1, \text{ если деталь перекрывает датчик;} \\ 0 \text{ — в противном случае.} \end{cases}$$

Согласно рис. 8.3 можно записать десятиразрядные двоичные коды для 52 возможных положений датчиков. Для разделения 10 возможных положений детали скоба число датчиков может быть минимизировано и доведено до четырех.

Производительность рассматриваемого робота определяется в основном временем разворота детали в захвате при ее движении по конвейеру.

Для захватывания неподвижных деталей, имеющих параллельные ребра, разработан робот с системой технического зрения, выполненной на основе интегральной фотоприемной матрицы МФ-16. Использование эффекта разворота детали при захвате с плоскопараллельными губками позволяет значительно упростить процесс выбора угла ориентации.

Можно определить с требуемой точностью угол γ между поверхностью детали и опорной поверхностью, который обеспечивает разворот детали в захвате.

Возможны три варианта захватывания детали. В первом случае (рис. 8.4, *а*) вершины детали не попадают на поверхность губки захвата; во втором случае (рис. 8.4, *б*) происходит контакт в одной вершине детали, а в третьем случае (рис. 8.4, *в*) — в двух вершинах.

Необходимо определить угол γ между поверхностью участка захватывания размером l и поверхностью губки захвата, при котором деталь не будет разворачиваться. Деталь остается неподвижной в захвате, если

$$M(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2) \leqslant M(\mathbf{F}_{т1}, \mathbf{F}_{т2}) + M_т, \tag{8.1}$$

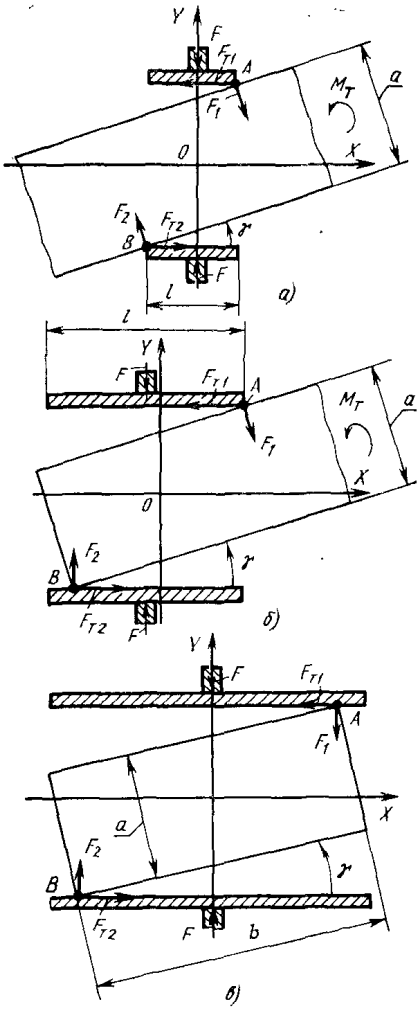
где $M(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2)$ — момент пары сил, создаваемый губками захвата; $M(\mathbf{F}_{т1}, \mathbf{F}_{т2})$ — момент, создаваемый парой сил трения; $M_т$ — интегральный момент трения между поверхностью детали и опорной поверхностью.

Учитывая, что $|\mathbf{F}_{т1}| = |\mathbf{F}_{т2}| = f|\mathbf{F}_1|$; $|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2|$, выражение (8.1) для случая, показанного на рис. 8.4, *в*, можно переписать в виде

$$\operatorname{sign}(\operatorname{ctg}\gamma - k)(b\cos\gamma - a\sin\gamma) \leqslant f(b\sin\gamma + a\cos\gamma) + M_т/F, \tag{8.2}$$

где a, b — длина сторон детали; $k\ (b/a) \geqslant 1$; f — коэффициент трения между деталью и губкой захвата.

Примем $M_т = \frac{2}{3} P f_1 \sqrt{\frac{S}{\pi}}$, где P — масса детали; f_1 — коэффициент трения между поверхностью детали и опорной поверхностью.



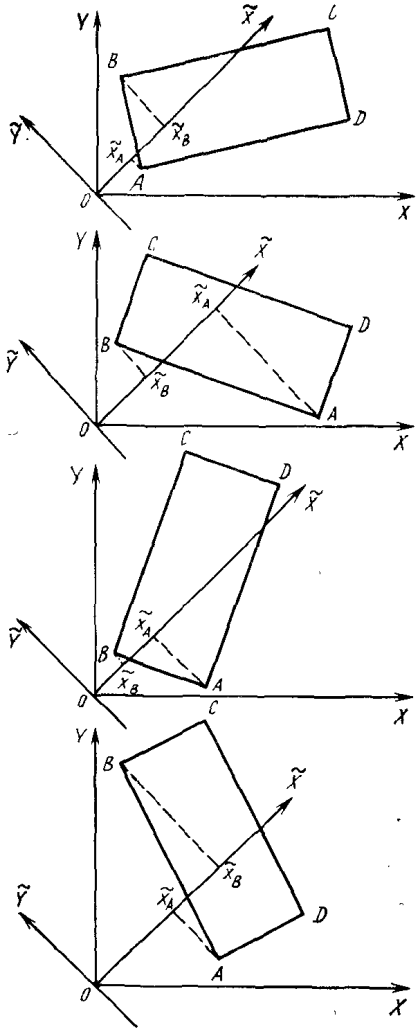


Рис. 8.4. Варианты схемы захватывания детали

Рис. 8.5. Варианты ориентации детали

Для адаптивного промышленного робота $F \approx 10P$. Примем $f = f_1$; $S = ab$, тогда из выражения (8.2) получим

$$\sin(\alpha - \gamma) \leqslant \frac{0{,}04 f_1 \sqrt{ab}}{\sqrt{(1+f^2)(a^2+b^2)}}, \qquad (8.3)$$

где $\alpha = \operatorname{arctg} \dfrac{\operatorname{sign}(\operatorname{ctg}\gamma - k)\, k - f}{\operatorname{sign}(\operatorname{ctg}\gamma - k) + kf}$.

Анализируя выражение (8.3), получим, что для $k \in (1, \infty)$, $f, f_1 \in (0; 0{,}4)$ деталь будет разворачиваться в захвате при $|\gamma| < (7\pi/45)$.

Угол ориентации φ детали можно определить по следующим формулам (рис. 8.5):

$$\begin{gathered}(\Delta y \leqslant \Delta x) \cap (\tilde{x}_A + \tilde{y}_A \leqslant \tilde{x}_B + \tilde{y}_B) \Rightarrow \varphi \in (0;\ \pi/4);\\ (\Delta y > \Delta x) \cap (\tilde{x}_A + \tilde{y}_A > \tilde{x}_B + \tilde{y}_B) \Rightarrow \varphi \in (\pi/4;\ \pi/2);\\ (\Delta y \leqslant \Delta x) \cap (\tilde{x}_A + \tilde{y}_A > \tilde{x}_B + \tilde{y}_B) \Rightarrow \varphi \in (-\pi/4;\ 0);\\ (\Delta y > \Delta x) \cap (\tilde{x}_A + \tilde{y}_A \leqslant \tilde{x}_B + \tilde{y}_B) \Rightarrow \varphi \in (-\pi/2;\ -\pi/4),\end{gathered} \tag{8.4}$$

а угол γ', на который необходимо развернуть захват, определяется из выражения

$$\varphi \in \left[\frac{\pi}{4}(l-2),\ \frac{\pi}{4}(l-1)\right] \Rightarrow \gamma' = \frac{\pi}{4}(l-3/2), \tag{8.5}$$

где $l = 0,\ 1,\ 2,\ 3;\ \tilde{x} = \frac{1}{\sqrt{2}}(x+y);\ \tilde{y} = \frac{1}{\sqrt{2}}(-x+y);$

Δx, Δy — проекции сторон детали на оси OX и OY системы координат XOY; $\tilde{x}_A$, $\tilde{x}_B$ — проекции точек A и B на ось $O\tilde{X}$ системы координат $\tilde{X}O\tilde{Y}$, развернутой относительно исходной на угол $\pi/4$.

В настоящее время в промышленности широкое распространение получили детали, выполненные из немагнитных токопроводящих материалов (латуни, меди, алюминия, серебра и т. п.), которые штампуются из ленты. Для подачи подобных деталей на последующие технологические позиции необходимо обеспечить их ориентацию. Задачу ориентации таких деталей можно решать с помощью переменного магнитного поля. Эффект ориентирования достигается в результате взаимодействия внешнего переменного магнитного поля с индуцированным в детали полем вихревых токов.

Переменное высокочастотное электромагнитное поле может быть использовано для ориентации деталей по слабовыраженным геометрическим признакам (мелкая резьба, выточки, прорези, углубления и т. п.), по внутренним и скрытым особенностям, по физическим и механическим свойствам материалов, из которых изготовлена деталь. При оснащении электромагнитного ориентирующего устройства адаптивной системой можно определить также тип и ориентацию детали.

Немагнитные токопроводящие детали могут иметь электродинамические аналоги. Светлые зоны аналогов соответствуют более высокой эквивалентной электрической проводимости, а темные — пониженной. При прочих равных условиях переменное магнитное поле оказывает большее силовое воздействие на светлые участки аналога, чем на темные.

В качестве примера можно указать адаптивную систему определения положения и ориентации немагнитных токопроводящих деталей, прошедших первичную ориентацию в вибробункере. Из вибробункера детали, имеющие слабовыраженные геометрические признаки ориентации, могут перемещаться в одном из нескольких возможных положений. Датчик системы очувствления может быть выполнен в виде индуктивных катушек. Число и положение датчиков

выбирают согласно определенному алгоритму. При подходе детали к одному из датчиков происходит опрос датчиков, снимается сигнал, соответствующий наличию или отсутствию металла под датчиками. Полученный код дешифруется дешифратором, на i-й шине которого появляется сигнал, соответствующий i-му положению детали. При попадании детали в межполюсное пространство включенного электромагнита происходит срыв колебаний, и электромагнит подключается к генератору переменного тока в режиме сильных токов. При этом деталь однозначно ориентируется в отводящий лоток. Если необходимо осуществлять сортировку деталей, то число электромагнитов и отводящих лотков необходимо увеличить, а электромагниты подключать с соответствующей задержкой.

Для нормальной работы системы необходимо создать переменное магнитное поле в зазоре электромагнитов, обеспечить их своевременное включение в режиме слабых токов и переключение в режим сильных токов и отключение. Периодическое отключение электромагнитов, т. е. их функционирование в импульсном режиме, значительно снижает потребляемую мощность и уменьшает нагрев электромагнитов.

Для обеспечения ориентации детали в зазоре требуется создать необходимое воздействие электромагнита на деталь. Сила воздействия поля на деталь равна

$$F = \frac{B_0^2}{4\mu_0} S \bigwedge (\omega_*),$$

где B_0 — индукция магнитного поля в зазоре, тл; μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн·м$^{-1}$; S — площадь опорной поверхности детали, м^2; $\bigwedge (\omega_*)$ — безразмерная функция.

Безразмерный параметр ω_* называется обобщенной частотой и определяется по формуле $\omega_* = \sigma\mu_0\omega d^2$, где σ — удельная электрическая проводимость материала, Ом$^{-1}$·м$^{-1}$; ω — частота магнитного поля, с$^{-1}$; d — толщина детали, м.

Силовое воздействие на деталь увеличивается с ростом частоты поля. При достижении $\omega_* = 50$ рост частоты не сопровождается заметным возрастанием силы **F**, однако увеличивается разогрев детали вихревыми токами. Поэтому оптимальное значение ω_* следует выбирать исходя из допустимого нагрева детали во время ориентирования.

Производительность рассмотренной системы составляет 120—300 деталей в минуту.

8.3. Адаптивные роботы для адресования деталей на конвейере

Иллюстрацией роботизированной системы для адресования деталей на конвейере может служить конвейерно-складской робототехнический комплекс ПО «Кировский завод». Этот комплекс включает следующие основные элементы: подвесные склады-накопители деталей; главный транспортный конвейер; посты загрузки деталей

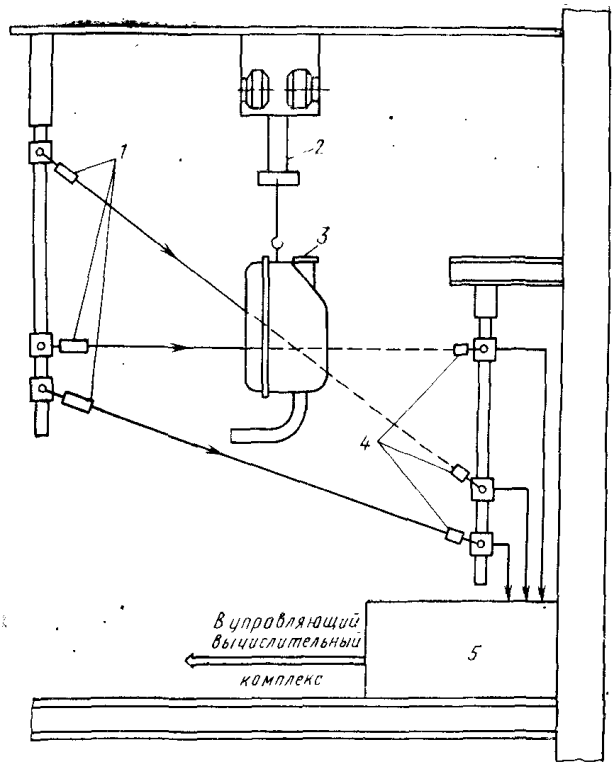


Рис. 8.6. Структурная схема логического распознавания деталей на подвесном толкающем конвейере

из механического цеха и посты разгрузки деталей на главный сборочный конвейер; обгонные пути для создания резервного потока деталей; систему учета и адресования деталей; управляющий вычислительный комплекс.

Для автоматизации функций учета и адресования деталей имеется информационно-измерительная система наблюдения за грузопотоками и система автоматического распознавания и идентификации деталей.

Первая из этих систем — оптико-электронная система очувствления — состоит из узконаправленных осветителей (источников света) и соответствующих им фотоприемников, между которыми перемещается распознаваемая деталь. Принцип действия этой системы иллюстрирует рис. 8.6.

В качестве источников света *1* используются лампы накаливания типа А12-6, в качестве фотоприемников *4* — фоторезисторы типа ФСД-Г1. Лампы и фоторезисторы шарнирно закреплены на специальных направляющих, что позволяет легко изменять их местоположение и ориентацию. Сигналы с фоторезисторов поступают на пороговые элементы, описываемые предикатами

$$\zeta_i(\omega) = \begin{cases} 0, \text{ если деталь } \omega \text{ перекрывает } i\text{-й} \\ \text{фотоприемник;} \\ 1 \text{ — в противном случае.} \end{cases}$$

Предикаты $\xi_1(\omega)$, $\xi_2(\omega)$, ..., $\xi_7(\omega)$ играют роль признаков, характеризующих распознаваемую деталь. Набор значений признаков $x(\omega) = |\xi_i(\omega)|_{i=1}^{7}$ есть код (образ) детали. Значения всех признаков ξ_1, ..., ξ_7 измеряются одновременно при строго определенном положении сцепа *2* с деталью *3* относительно информационно-измерительной системы источники света — фотоприемники. Это положение регистрируется с помощью специального датчика сцепа, подающего сигнал сначала на считывание признаков, а затем на отключение источников света (до прихода следующей детали). Время кодирования каждой детали не превышает 0,1 с. Кодирование,

распознавание и идентификация деталей происходят в процессе их движения, т. е. без остановки конвейера.

Адаптивный логический распознаватель 5 (дешифратор) работает следующим образом. При совпадении кода детали, перемещающейся по конвейеру, с эталонным кодом деталей определенного класса формируется номер этого класса. Причем в качестве эталонных кодов классов используются семиразрядные двоичные коды соответствующих деталей, предварительно снятые при номинальном (идеальном) режиме работы конвейера. Поэтому в номинальном режиме (т. е. при правильном подвесе деталей на сцепе и при отсутствии их колебаний) такой дешифратор обеспечивает безошибочное распознавание деталей.

Однако в производственных условиях часто наблюдаются значительные отклонения от номинального режима. В подобных случаях точность работы дешифратора значительно снижается. Основной причиной отказов и погрешностей являются разного рода непредсказуемые перемещения деталей в «поле зрения» информационно-измерительной системы. В этих условиях возникает необходимость адаптации к производственным возмущениям. Поэтому был разработан более совершенный автомат адаптивного распознавания, обладающий свойством инвариантности по отношению к указанным выше непредсказуемым перемещениям деталей. Адаптивный автомат работает в двух режимах: режиме обучения (или дообучения) и режиме принятия решений. В режиме обучения формируется обучающая выборка, по которой строится то или иное решающее правило. В режиме принятия решений это правило используется для автоматического распознавания деталей.

В производственных условиях обучающая выборка формировалась путем кодирования деталей из разных классов с помощью предикатов-признаков $\xi_1(\omega)$, $\xi_2(\omega)$, ..., $\xi_7(\omega)$, снимаемых информационно-измерительной системой, с обязательным указанием, к какому классу такая деталь принадлежит. По результатам наблюдения (кодирования) этих деталей сначала была сформирована выборка из 42 элементов. Причем относительно каждого элемента была указана принадлежность к одному из 11 классов деталей. Из технологии сборки следует, что классы I, II, IV, V, VII—X равновероятны, а априорные вероятности классов III, VI, XI вдвое больше, чем априорные вероятности остальных классов, т. е.

$$P_{\mathrm{I}} = P_{\mathrm{II}} = P_{\mathrm{IV}} = P_{\mathrm{V}} = P_{\mathrm{VII}} = P_{\mathrm{VIII}} = P_{\mathrm{IX}} = P_{\mathrm{X}} = 1/4;$$
$$P_{\mathrm{III}} = P_{\mathrm{VI}} = P_{\mathrm{XI}} = 1/7.$$

Анализ полученной выборки показал, что вследствие непредсказуемых результатов для ряда элементов, принадлежащих разным классам, значения всех семи признаков совпадают. Этот факт говорит о том, что классы в семимерном пространстве признаков пересекаются, поэтому при окончательном формировании обучающей выборки из числа «пересекающихся» элементов выбирались те, для которых вероятность (частота встречаемости) наибольшая. В ре-

зультате была получена новая обучающая выборка из 32 непересекающихся элементов. По этой выборке строилось оптимальное логическое решающее правило, реализуемое автоматом распознавания.

Оптимально решающее правило строится в виде дизъюнкции конъюнкций от исходных признаков-предикатов. Задается критерий качества каждой анализируемой конъюнкции, вычисляемой непосредственно на обучающей выборке. На k-м шаге рассматривается каждая конъюнкция (k — 1)-го ранга, построенная на предыдущем шаге. По этим конъюнкциям строятся новые конъюнкции k-го ранга путем присоединения к ним ранее не использованных признаков-предикатов и их отрицаний. Среди полученных таким образом конъюнкций отбирается наилучшая (в смысле заданного критерия качества) конъюнкция. Далее процесс повторяется, пока не сработает правило остановки алгоритма.

Согласно критерию Байеса, для каждой анализируемой конъюнкции вычисляются апостериорные вероятности классов и выбирается та конъюнкция, для которой эта вероятность максимальна. Если апостериорная вероятность принимает значение 1, то это означает, что соответствующая конъюнкция характеризует элементы данного класса. Такая конъюнкция запоминается как элемент искомого решающего правила, называемый элементарным решающим правилом. Как только синтезированные элементарные решающие правила охарактеризуют все элементы обучающей выборки, алгоритм останавливается (прекращает работу). В результате получается логическое решающее правило последовательного характера, безошибочно распознающее элементы обучающей выборки.

Оптимальное логическое решающее правило характеризуется двумя параметрами — рангом и сложностью. Ранг — это максимальный ранг элементарных решающих правил. Он лимитирует число необходимых измерений предикатов-признаков. Сложность N — это общее число используемых в решающем правиле признаков. Ясно, что чем меньше значения параметров r и N, тем предпочтительнее (при прочих равных условиях) решающее правило.

Оптимальное логическое решающее правило может быть графически представлено в виде бинарного дерева решений, называемого оптимальным распознающим графом. Каждое элементарное решающее правило изображается ветвью этого графа, предикат-признак — узлом, а код класса — листом с соответствующим номером. Из каждого узла исходят два ребра, соответствующие возможным значениям данного признака.

В режиме распознавания сначала измеряется признак, соответствующий узлу первого уровня (ранга). Далее по ребру, отвечающему полученному значению признака, осуществляется переход к узлу второго уровня (ранга) и измерение соответствующего признака. Процесс «раскрытия» узлов продолжается до тех пор, пока не встретится лист, содержащий код некоторого класса, к которому и относится данный объект.

Автоматизация управления конвейерно-складским робототехническим комплексом требует не только распознавания деталей

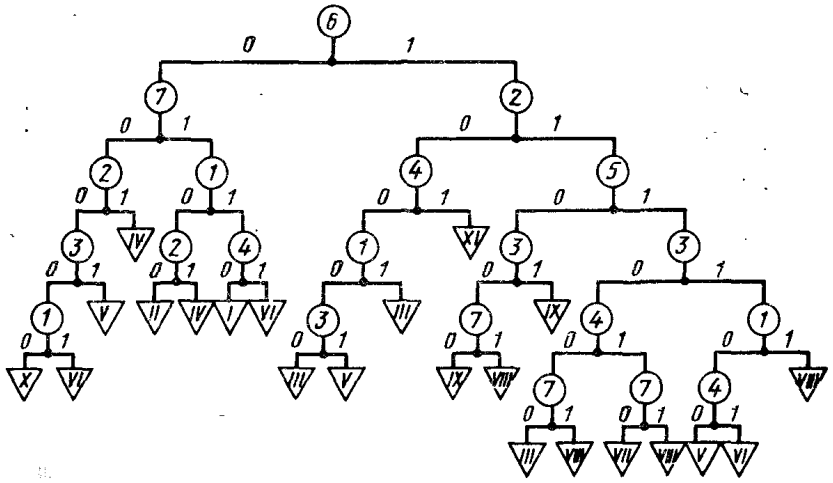


Рис. 8.7. Оптимальный распознающий граф

с целью их классификации и учета, но и идентификации деталей определенного типа.

Схема синтеза оптимальных идентифицирующих правил аналогична описанной выше. Эти правила также могут быть представлены в виде ориентированного графа того же типа, что и распознавающий граф. Отличительной чертой идентифицирующего графа является то, что все листья относятся к одному классу. Совокупность идентифицирующих графов удобно представлять в виде орбитального графа-фрейма классов. На нулевой орбите этого графа располагаются листья с указанием номеров классов. На первой орбите размещаются узлы первого уровня идентифицирующих графов, на второй орбите — узлы второго уровня и т. д.

Процесс идентификации класса по графу сводится к последовательному раскрытию его узлов-признаков. На первом шаге вычисляется значение признака-предиката, отвечающего первому узлу. Если это значение соответствует исходящему из узла ребру, то следует измерить значение признака, отвечающего узлу второй орбиты, к которому ведет данное ребро, и т. д. Таким образом, если удастся дойти до конца какой-либо ветви, то происходит идентификация соответствующего класса. Если ребро, соответствующее вычисленному значению очередного признака, отсутствует, то это означает, что исследуемый объект данному классу не принадлежит.

При испытании автоматов распознавания и идентификации сначала по обучающей выборке, содержащей 32 элемента, были построены оптимальные логические решающие и идентифицирующие правила. Их графическое представление дано на рис. 8.7 и 8.8 соответственно.

Основные параметры синтезированного распознающего графа таковы: ранг $r = 6$, сложность $N = 21$. Он обеспечивает безошибочное распознавание обучающей выборки. Этим же свойством обладает и идентифицирующий граф. Его параметры (по классам деталей)

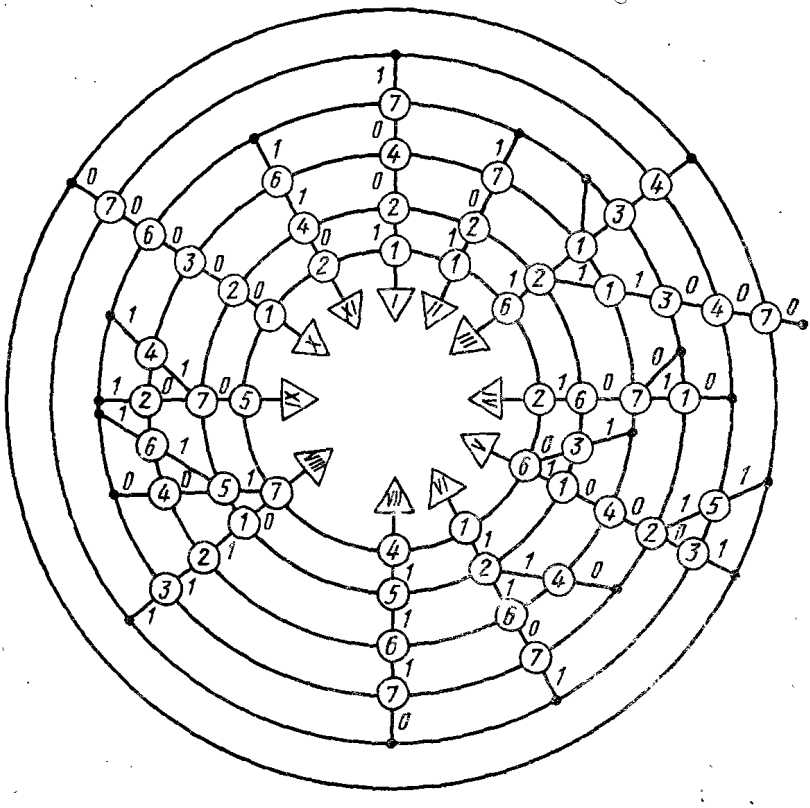
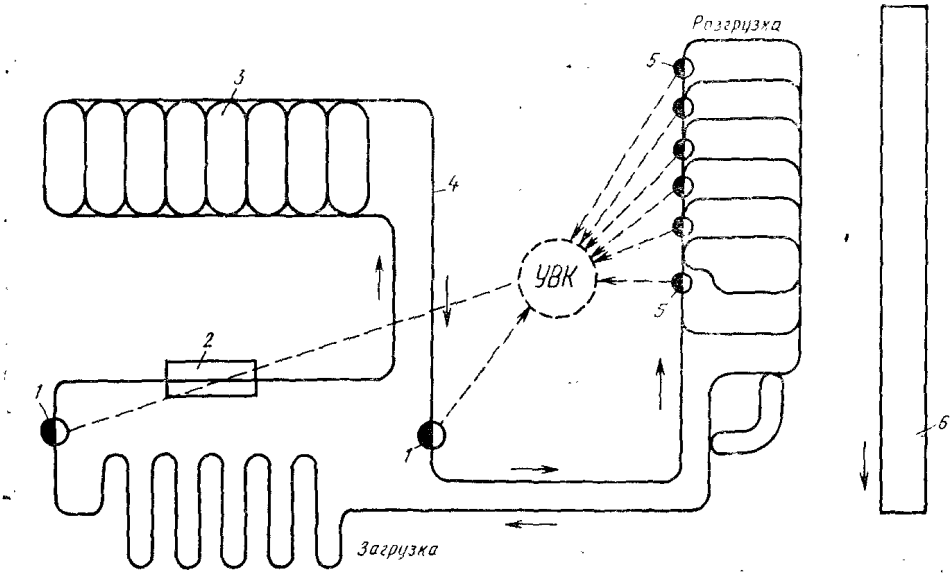


Рис. 8.8. Оптимальные графы классов деталей

Рис. 8.9. Схема конвейерно-складского комплекса с встроенными автоматами распознавания и идентификации деталей



указаны в табл. 8.2, где для краткости записи вместо предиката ξ_1 указывается лишь его номер i, а отрицание предиката ξ_j означается чертой над номером $\bar{j}$.

Таблица 8.2

Класс	Оптимальное логическое описание классов деталей трактора К-701	Параметры	
		r_i	N_i
I	$1\bar{2}\bar{4}7$	4	4
II	$\bar{1}\bar{2}7$	3	3
III	$1\bar{2}6 \vee \bar{1}\bar{2}\bar{3}6 \vee 1\,2\,\bar{3}\,4\,6\,\bar{7}$	6	13
IV	$2\bar{6}\bar{7} \vee \bar{1}\,2\,\bar{6}\,7$	4	7
V	$3\bar{6} \vee \bar{1}\bar{2}\,3\,\bar{4} \vee \bar{1}\,2\,3\,\bar{4}\,5\,6$	6	13
VI	$1\bar{5} \vee 1\bar{2}\,4\,5 \vee 1\,2\,4\,5\,\bar{6}$	5	11
VII	$4\,5\,6\,\bar{7}$	4	4
VIII	$3\,7 \vee \bar{3}\,5\,6\,7 \vee \bar{3}\,\bar{4}\,5\,6\,7$	5	11
IX	$2\bar{5}\bar{7} \vee 2\,4\,\bar{5}\,7$	4	7
X	$\bar{1}\bar{2}\bar{3}\bar{6}\bar{7}$	5	5
XI	$\bar{2}\bar{5}\bar{6}$	3	3

Для увеличения точности распознавания в изменяющихся производственных условиях необходимо дообучать синтезированные распознающие и идентифицирующие автоматы, добиваясь их инвариантности по всему классу возможных преобразований. С этой целью из контрольной выборки были отобраны элементы, ранее не встречавшиеся в обучающей выборке, и их добавили к прежней выборке. В результате была получена «новая» обучающая выборка, состоящая из 45 элементов. В число этих элементов вошел и существенно новый элемент, отвечающий коду «пустой сцеп», образующий XII класс.

По полученной таким образом расширенной обучающей выборке вновь строились «дообученные» распознающие и идентифицирующие графы. Преимуществом «дообученных» распознающих и идентифицирующих графов является их инвариантность практически к любым возможным преобразованиям деталей. Вследствие этого они обеспечивают высокую точность распознавания и идентификации деталей.

Оптимальные распознающие и идентифицирующие графы и отвечающие им логические решающие и идентифицирующие правила допускают простую программную и аппаратурную реализацию. Поэтому они были реализованы сначала в виде программы для микроЭВМ «Электроника-60», а затем аппаратурно — на базе логических элементов (типа И, ИЛИ, НЕ).

Схема конвейерно-складского робототехнического комплекса с встроенными адаптивными автоматами распознавания и идентификации изображена на рис. 8.9. Этот комплекс работает следующим образом. При появлении деталей из механического цеха автомат распознавания *1*, установленный перед окрасочной камерой *2*, сначала их классифицирует, а затем посылает соответствующий сигнал в управляющий вычислительный комплекс (УВК). Последний оперативно выбирает нужную программу окраски и задает требуемый режим работы окрасочной камеры. Окрашенные детали поступают далее на подвесные склады-накопители *3*, а оттуда, по мере необходимости, на главный транспортный конвейер *4*. Здесь детали вновь классифицируются (с помощью автомата распознавания *5*), и УВК вырабатывает соответствующий сигнал на коммутатор пере-

ключения стрелок (веток) конвейера. Этот коммутатор подключает дополнительные приводы тех стрелок, которые обеспечивают перевод деталей на нужные ветки. Среди веток конвейера предусмотрена и резервная ветка, привод которой возвращает деталь для повторного распознавания. При поступлении деталей на подвесные склады-накопители, связанные с главным сборочным конвейером, автоматы идентификации адресуют их в соответствующие накопители. Каждый такой накопитель служит для хранения деталей от одного до трех классов. Одновременно с идентификацией осуществляется подсчет деталей каждого класса, поступивших на посты разгрузки главного сборочного конвейера *6*.

Адаптированный конвейерно-складской комплекс позволяет (благодаря использованию автоматов распознавания и идентификации) оптимизировать процесс доставки деталей на главный сборочный конвейер. При этом высокая точность распознавания и идентификации деталей позволяет сократить остановки главного сборочного конвейера и тем самым повысить его производительность.

8.4. Контрольно-измерительные роботы

Контрольно-измерительные роботы находят все более широкое применение в металлургической, радиоэлектронной, приборостроительной, станкостроительной и других отраслях промышленности как эффективное средство измерения и контроля качества изделий. Они обеспечивают измерение параметров по заданной программе и открывают возможность для полной автоматизации различных процессов производства и технологии. Особенно перспективно применение контрольно-измерительных роботов в гибких автоматизированных производствах как подсистем контроля и управления качеством. Как у нас в стране, так и за рубежом эти роботы широко применяют для особо точного измерения геометрических характеристик деталей сложной конфигурации.

Многие контрольно-измерительные роботы представляют собой модификацию станков с ЧПУ, у которых режущий инструмент заменен измерительной головкой (щупом). Типичная измерительная головка имеет три степени подвижности, соответствующие декартовым осям координат робота.

В качестве примера можно указать роботы ВЕ-155 и УИМ-28. Робот ВЕ-155 представляет собой универсальную автоматизированную машину для высокоточных измерений с погрешностью не более 0,01 мм. Измерительная головка может перемещаться в трех ортогональных направлениях со скоростью 2—6 м/мин. Для управления исполнительными приводами используется унифицированный комплекс, в состав которого входят микроЭВМ типа СМ-1, устройства ввода и вывода информации на перфоленте, алфавитно-цифровой дисплей, устройства цифровой индикации результатов измерений, измерительный усилитель и блоки сервоуправления электрическими приводами.

Программа измерений записывается на перфоленту и обеспечивает автоматическое наведение измерительной головки на нужные элементы детали. Результаты измерений, а также номинальные значения измеренных характеристик печатаются в виде протокола.

В роботе УИМ-28 перемещение измерительного щупа обеспечивается перемещением кареток вдоль направляющих, параллельных трем координатным осям. Оператор, поворачивая ручки задатчиков перемещений, формирует программу наведения щупа, т. е. программное движение. Затем эта программа в виде «уставок» подается на вход исполнительных приводов на базе двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, работающих в режиме сервоуправления с обратной связью по линейному перемещению каретки, угловой скорости вала двигателя и току якоря. Высокая точность измерений обеспечивается благодаря использованию в качестве датчиков линейных перемещений лазерных интерферометров с разрешающей способностью порядка 0,2 мкм.

Для полной автоматизации процесса измерений создан цифровой автомат адаптивного управления программным движением.

Процесс автоматического программирования движений измерительного щупа осуществляется следующим образом. На первом (предварительном) этапе по чертежу детали определяется минимальное число точек, подлежащих измерению, и уточняются место и способ крепления детали, тип измерительного щупа, форма протокола измерений и т. п. Измеряемые точки нумеруются на чертеже (в порядке наведения на них щупа) и кодируются их координатами (в системе координат детали). На втором этапе по этим данным строится программа наведения щупа. При этом центр измерительной головки наводится на выбранную точку детали, заданную ее координатами. В момент соприкосновения щупа с деталью происходит автоматическое считывание измеряемых координат.

В состав системы адаптивного управления входят блок управления памятью, один — два модуля ПЗУ, двухразрядные наращиваемые модули арифметико-логического устройства, четыре — пять регистров. Быстродействие арифметико-логического устройства в конвейерном режиме составляет 0,1 мкс на микрокоманду, сложение модулей 32-разрядных чисел в ПЗУ выполняется за 0,1 мкс, умножение — за 2 мкс.

Быстродействие мультимикропроцессорного автомата адаптивного управления позволяет не только полностью автоматизировать процесс наведения измерительного щупа, но и гарантирует высокое качество переходных процессоров при неопределенности и непредсказуемом дрейфе параметров роботов типа УИМ-28.

Использование адаптивного управления дает возможность повысить производительность контрольно-измерительных роботов не менее чем на 20 %, улучшить качество их управления, увеличить точность и надежность измерительных операций, полностью автоматизировать процесс наведения измерительного щупа и тем самым облегчить работу человека-оператора.

К контрольно-измерительным роботам можно также отнести целый класс устройств автоматической контрольно-диагностической техники для металлургической, энергетической, машиностроительной и других отраслей народного хозяйства.

Если анализировать основные тенденции развития современного машиностроения, то нетрудно заметить, что выпускаемые технические устройства все более усложняются как в количественном отношении (увеличивается количество деталей, узлов, материалов, комплектующих элементов), так и в качественном (повышаются требования по надежности, долговечности, эстетическому оформлению и т. д.).

Проблема повышения надежности и долговечности современных машин может быть в значительной степени решена только при условии, если контрольно-измерительные роботы будут широко применяться как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации этих машин. Учитывая то, что ни одна деталь и ни одно изделие не выпускаются без проверки полученного результата, можно заключить, что контроль качества является одной из самых массовых и ответственных технологических операций.

Для автоматического контроля качества и диагностирования создано достаточно большое количество разнообразных устройств, действие которых основано на использовании различных физических эффектов, свойств поля, излучения и вещества — пенетранта. Как в нашей стране, так и за рубежом, широкое применение получили акустические, магнитные, электромагнитные, радиационные, радиоволновые, оптические, тепловые, капиллярные, вибрационные, звуковые и другие автоматические устройства контроля качества и диагностирования.

Большое разнообразие параметров качества (около 400) и влияющих на него факторов обусловливает необходимость создания широкой номенклатуры контрольно-измерительных роботов. Эту проблему можно решить путем создания многофункциональных устройств. Примером может служить контрольно-измерительный робот трубопрокатного стана (рис. 8.10). В его состав входят два комплекта измерительных приборов, средств механизации, технологической автоматики и вычислительной техники.

Приборный комплекс включает электромагнитный прибор для выявления труб из стали незапланированной марки, оптический прибор для контроля наружного диаметра, электромагнитно-акустический прибор для контроля толщины стенки труб, магнитный феррозондовый прибор для выявления в трубах дефектов типа нарушения сплошности, оптический прибор для выявления пристеночных дефектов на внутренней поверхности труб и оптические приборы для измерения длины и учета количества годных труб. По результатам контроля работает система сопровождения и сортировки труб, имеющая вычислительный комплекс и пульт управления.

В состав механической части робота входят транспортные рольганги, устройства для центрирования трубы при прохождении через приборы, продувочная машина, перекладыватели, сбрасыватели

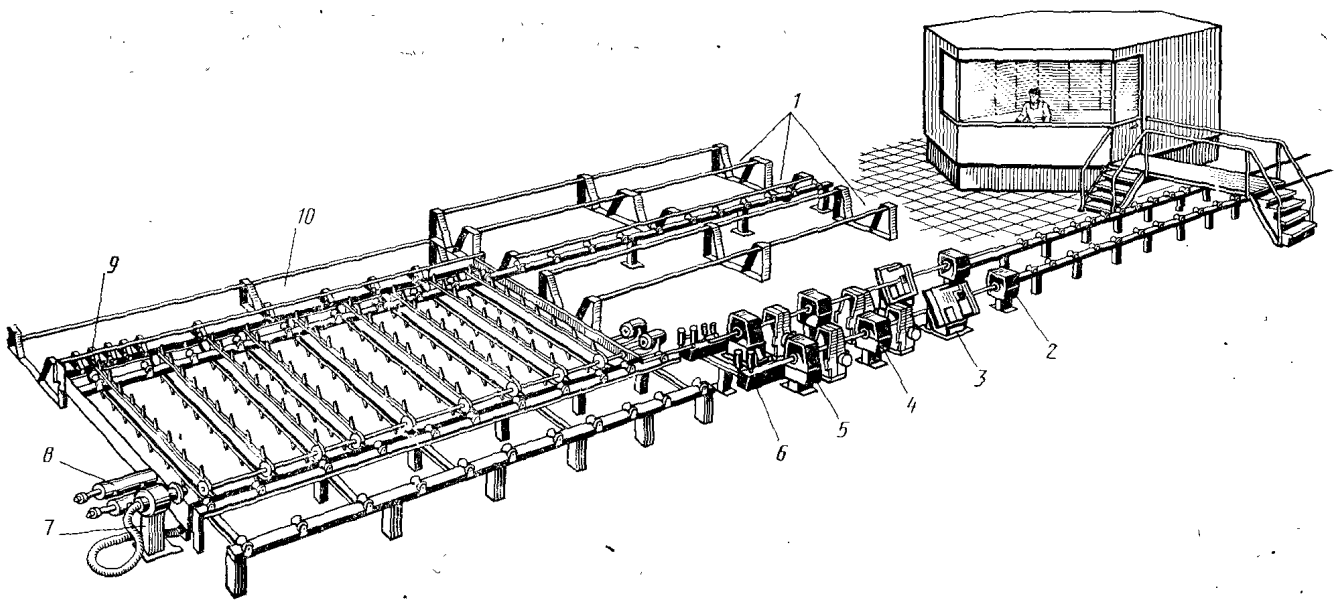


Рис. 8.10. Контрольно-измерительный робот трубопрокатного стана:

1 — карман бракованной продукции; *2* — прибор контроля марки стали; *3* — прибор контроля наружного диаметра; *4* — прибор контроля толщины стенки; *5* — приборы выявления нарушений сплошности; *6* — прибор для определения внутренних плен; *7* — продувочная установка; *8* — блок дефектоотметчиков; *9* — измеритель длины труб; *10* — карман годной продукции

и перекрыватели карманов. В помещении поста оператора размещается вся электронная часть комплекса средств контроля, пульт управления участком контроля ЭВМ и другая аппаратура.

Робот обеспечивает контроль качества труб как в автоматическом, так и в полуавтоматическом режиме. Информация о результатах контроля каждой трубы и исправности устройств, входящих в систему, подается на пульт оператора и в ЭВМ.

Аналогичные роботы создаются для бесшовных труб, а также для электросварных труб различных типоразмеров.

Специализированный робот создан для автоматического комплексного контроля качества прутков диаметром 1—6 мм из ферромагнитных и неферромагнитных сталей с электрической проводимостью свыше 10^6 См/м.

Контролируемые изделия — прутки длиной 1—2,5 м. Материал — стали инструментальные, конструкционные, коррозионностойкие, автоматные и др. Скорость контроля — 1,9 м/с. Производительность робота — не менее 1100 прутков в час.

При контроле прутков выявляют: поверхностные дефекты типа нарушений сплошности (трещины, волосовины, неметаллические включения и т. п.) с глубиной свыше 0,05 мм; поверхностные обезуглероженные участки; неоднородность структуры и отклонение от ГОСТа химического состава материала прутков; диаметр прутков.

По результатам контроля прутки автоматически поступают в четыре кармана: брак по металлу; брак по диаметру «+»; брак по диаметру «—»; годные.

В состав робота входят передатчик прутков, подающий рольганг, стол дефектоскопии, ведущие ролики, дефектоскоп, прибор для контроля марки стали, установка для контроля обезуглероженного слоя, демагнизатор, автомат для контроля диаметра, панель электрооборудования.

Для холоднокатаных листов контрольно-измерительные роботы монтируют на агрегатах поперечной резки полос шириной 700—2500 мм и толщиной 0,7—2,2 мм. Они включают магнитный дефектоскоп, рентгеновский измеритель толщины, систему сопровождения забракованных листов и устройство рассортировки с двумя карманами для годной и забракованной продукции. Автоматический контроль и разбраковка холоднокатаных листов из сталей 08кп и Ст3 осуществляются при скорости 1—3 м/с.

В качестве примера использования контрольно-измерительных роботов в энергетическом машиностроении можно привести автоматическую контрольно-сигнальную аппаратуру (типа КСА-11, КСА-15), которая по уровню вибрации и статических смещений вала роторных машин (турбин, компрессоров, насосов и др.) контролирует режим эксплуатации этих машин и в случае выхода указанных параметров из допуска выключает машины. В качестве измерительных датчиков используются пьезоэлектрические преобразователи уровня виброскорости, вихретоковые преобразователи относительных виброперемещений, вихретоковые измерители разности линейных перемещений деталей и др.

Учитывая, что число контрольно-измерительных каналов крупных агрегатов непрерывно увеличивается, достигая, например, в АЭС нескольких десятков тысяч, необходимо интенсивно развивать и совершенствовать контрольно-измерительные роботы.

Наличие множества специализированных систем сканирования, связанное с большим разнообразием объектов контроля, до последнего времени не позволяло решить проблему создания и широкого внедрения унифицированных контрольно-измерительных роботов для различных отраслей народного хозяйства. Массовое производство промышленных роботов первого поколения и манипуляторов в нашей стране устранило препятствия на этом пути, позволив в качестве главного элемента систем сканирования автоматизированных средств контроля использовать серийный робот-манипулятор и создать на этой основе широкую гамму роботизированных технологических комплексов неразрушающего контроля (РТК НК).

В основу создания РТК НК положена идея использования совокупности серийно выпускаемых приборов неразрушающего контроля, промышленных роботов, выполняющих функции перемещения датчика прибора относительно объекта контроля и разбраковки изделий, а также специализированных устройств связи прибора, робота и объекта контроля между собой. В настоящее время созданы РТК НК, в которых используются основные физические методы неразрушающего контроля. Следует отметить, что все РТК НК имеют выход на микроЭВМ и могут управляться по определенным программам контроля (пуск, останов, сортировка, перемещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях, поворот, позиционирование и т. д.), без чего невозможно создание гибких автоматизированных производств.

Возможности роботизации — одной из массовых технологических операций — можно продемонстрировать на примере РТК НК качества термообработки ферромагнитных изделий. В РТК НК использован вихретоковый структуроскоп ВС-10П (ВС-11П), который по результатам измерения электромагнитных характеристик материала (начальная магнитная проницаемость, удельная электрическая проводимость) осуществляет разбраковку поршневых пальцев как по нижней, так и по верхней границам допуска на твердость и на химический состав углеродистой стали. Разрешающая способность по углероду составляет 0,2 %, чувствительность по твердости — 5 единиц *HRC*. Несмотря на высокие технические характеристики структуроскопа ВС-10П, его широкое использование в промышленности, в частности, для контроля твердости поршневых пальцев на заводах автотракторной промышленности, сдерживалось вследствие нестабильности показаний прибора, связанной с недостаточной точностью установки контролируемой детали относительно оси проходного вихретокового преобразователя и краев магнитопровода измерительной катушки в производственных условиях. Необходимо было также обеспечивать минимально допустимое время выдержки поршневого пальца в датчике в процессе контроля при максимальной производительности.

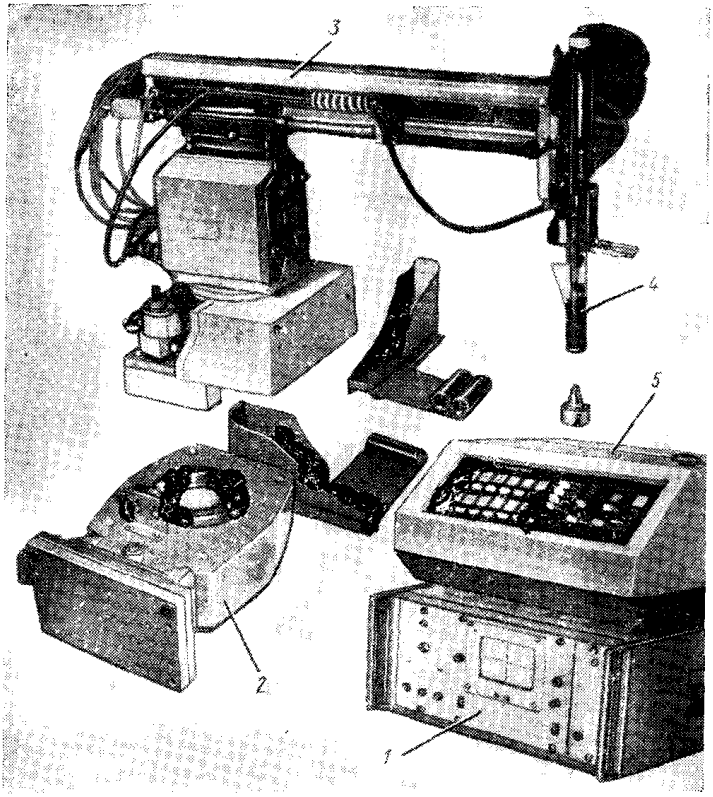


Рис. 8.11. РТК НК качества термообработки ферромагнитных материалов:
1 — вихретоковый структуроскоп; *2* — проходной преобразователь; *3* — промышленный мини-робот; *4* — контролируемое изделие (поршневой палец); *5* — электронное цикловое программное устройство ЭЦПУ-6030

РТК НК позволяет полностью устранить субъективные факторы при контроле качества термообработки деталей типа валик и втулка. а также исключает возможность неправильной сортировки изделий. В его состав входит вихретоковый структуроскоп ВС-10П (ВС-11П) с набором проходных датчиков для контроля изделий разного диаметра, промышленный робот типа ПМР-0,5-200кВ, устройства связи прибора с роботом и объектом контроля. РТК НК представляет собой стационарное технологическое оборудование (рис. 8.11). Захват робота берет деталь и устанавливает внутри соосно с проходным преобразователем, выдерживает деталь внутри преобразователя 2 с и в зависимости от результирующего сигнала прибора передает деталь в карман годных или забракованных деталей.

Основные технические характеристики РТК НК следующие: диаметр контролируемых изделий 5—150 мм; масса контролируемых изделий не более 1 кг; диаметры проходных отверстий вихретоковых преобразователей — 6, 9, 23, 30, 49, 73, 98, 156 мм; производительность — 600 операций/ч; габаритные размеры приборной части 530 × 410 × 400 мм, механической части 2000 × 1000 × 1000 мм; максимальные перемещения детали — в вертикальной плоскости

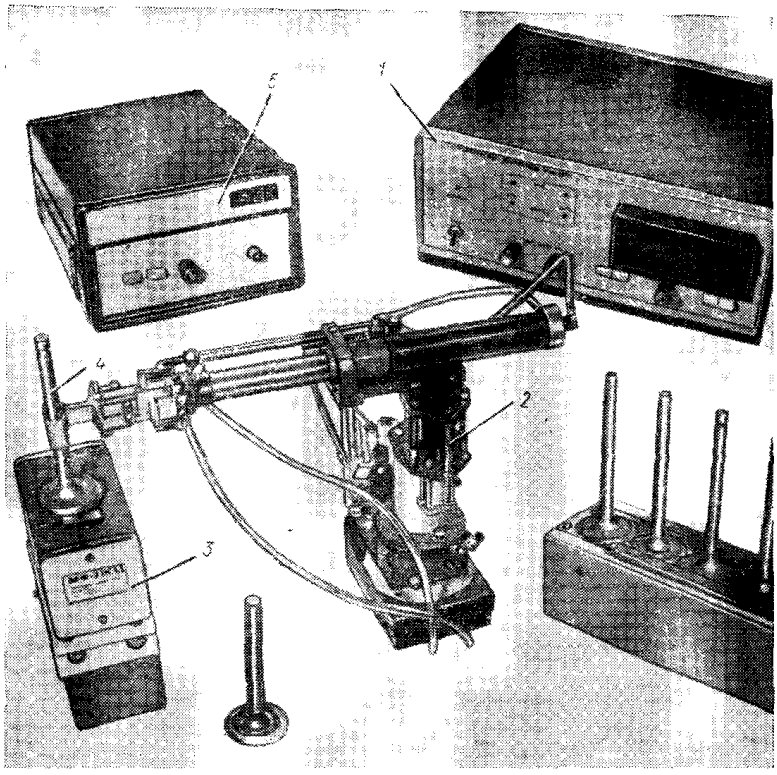


Рис. 8.12. РТК НК качества клапанов:
1 — прибор измерения коэрцитивной силы; *2* — промышленный робот; *3* — преобразователь; *4* — клапан; *5* — устройство связи прибора с роботом

110 мм; потребляемая мощность 450 В·А; давление сжатого воздуха 0,4 МПа.

Для автоматического контроля и разбраковки клапанов поршневых двигателей по качеству термической обработки создан РТК НК на базе коэрцитиметра МФ-31КЦ и промышленного робота ПР5-2П.13.4.3 (рис. 8.12).

Как известно, прибор МФ-31КЦ измеряет силу размагничивающего тока, пропорциональную коэрцитивной силе, которая связана с механическими свойствами материала. Прибор осуществляет сравнение размагничивающих токов эталонного образца и испытуемой детали, установленной на датчик, и подает соответствующий сигнал на устройство связи робота с прибором. В зависимости от значения сигнала прибора «брак» или «годен» захват робота переносит деталь в соответствующий бункер. В функции робота входит также точное позиционирование детали относительно датчика коэрцитиметра и обеспечение стабильного минимального времени намагничивания и размагничивания детали.

Основные технические характеристики РТК НК качества клапанов следующие: диапазон измерения тока размагничивания 0—30 мА, погрешность измерения 6 %, производительность — 480 опе-

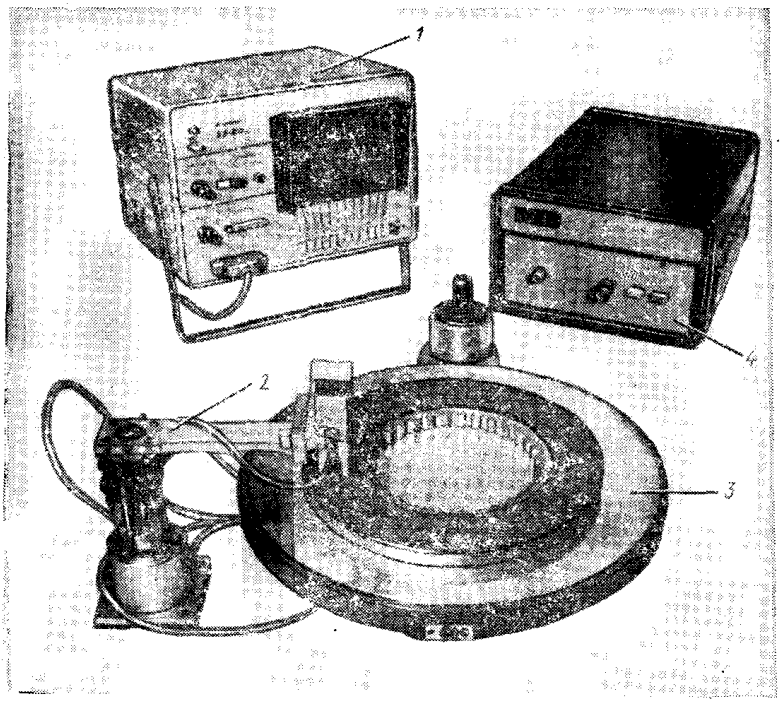


Рис. 8.13. РТК НК дефектов многослойных покрытий:
1 — акустический дефектоскоп; *2* — модуль линейного перемещения от робота; *3* — устройство перемещения объекта контроля; *4* — устройство связи прибора с роботом

раций/ч; максимальное перемещение контролируемой детали в горизонтальной плоскости 105 мм, в вертикальной 50 мм, угловое перемещение в горизонтальной плоскости 180°; габаритные размеры приборной части РТК НК 350 × 130 × 260 мм, механической части 1000 × 1000 × 700 мм.

Во многих случаях целесообразно объединение функций роботизированных систем сканирования РТК НК и широко распространенных в настоящее время разнообразных устройств перемещения объектов в зоне контроля. На рис. 8.13 показан дефектоскопический РТК НК многослойных изделий, в состав которого входят акустический дефектоскоп АД-60С, промышленный робот типа ПР5-2 и устройства связи прибора, робота и объекта. В данном случае РТК НК используется для выявления дефектов соединения накладок тормозных дисков, которые вращаются вокруг своей оси с помощью дополнительного приводного устройства; захват робота осуществляет только возвратно-поступательное и вертикальное перемещение датчика дефектоскопа. РТК НК позволяет выявлять дефекты типа непроклея или расслоения на глубине до 30 мм, минимальная площадь обнаруживаемых дефектов 1 см^2. Производительность РТК НК — 600 измерительных операций/ч, число каналов для анализа спектра сигнала 12, диапазон анализируемых частот 5—20 кГц, частота вращения детали 5 об/мин. Габаритные размеры

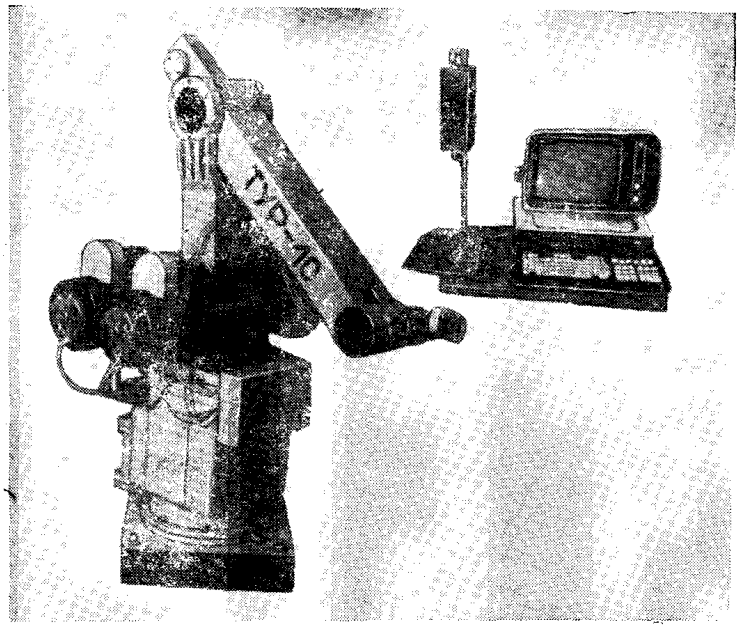


Рис. 8.14. РТК контрольных и сборочных операций

механической части РТК НК 500 × 1000 × 500 мм, общая масса 60 кг.

Технический уровень и возможности РТК НК в равной степени зависят от уровня используемых приборов неразрушающего контроля и уровня промышленных роботов. В устройствах неразрушающего контроля широкое применение находят СТЗ с цифровой обработкой изображения.

СТЗ, установленная на промышленный робот типа ТУР-10, имеющий пять степеней подвижности, грузоподъемность 10 кг и возможность вращения, качания, сгиба и поворота кисти и закрепленного на ней датчика или детали в рабочей зоне до 1250 мм, представляет собой новый качественный уровень РТК НК. Подобные контрольно-измерительные роботы могут одновременно выполнять часть функций сборочных, покрасочных, сварочных и других автоматизированных технологических агрегатов.

РТК НК, в состав которого входят оптическая система ОТ-10МФ и промышленный робот ТУР-10 с устройством управления УПМ-772 (рис. 8.14), может быть использован для полной автоматизации контроля дефектов на основе использования магнитопорошкового, капиллярного, радиографического и оптического методов, что ранее достичь было крайне затруднительно.

СТЗ предназначена для обработки визуальной информации посредством преобразования плоского оптического изображения рабочей сцены в бинарную матрицу (цифровые коды). Она осуществляет ввод данных в ЭВМ «Электроника-60», где в соответствии с программой обработки осуществляется идентификация объектов, определение

их координат, размеров, ориентации и т. п. СТЗ используется также для контроля наличия изделий на рабочей сцене при линейных скоростях движения объекта в поле зрения датчика до 10 м/с.

Преобразователем является фотодиодная матрица МФ-14Б, в плоскости которой находятся 32 × 32 чувствительных элемента. Матрица включена в режиме накопления и осуществляет преобразование оптического сигнала в электрический аналоговый сигнал пропорционально световому потоку за время накопления. Допускается регулировка интервала времени накопления и чувствительности по условиям освещенности рабочей сцены.

Результат обработки изображения в цифровой форме выдается через выходной буфер ЭВМ в систему управления роботом. СТЗ имеет две градации яркости; выходной сигнал в виде цифрового 16-разрядного двоичного кода; время обработки изображения 60 мс; разрешение 2,5 мм.

РТК НК позволяет осуществлять угловые перемещения кисти с фотодиодным датчиком или деталью при вращении в пределах 340°, при качании — ±45°; при сгибе кисти — 240° и повороте кисти на ±90°.

Сравнительно большие размеры, масса и относительная сложность устройства данного РТК НК окупаются новыми разноплановыми перспективами повышения качества и производительности многих контрольных операций.

Глава 9 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АДАПТИВНЫХ РОБОТОВ И ИХ СИСТЕМ ОЧУВСТВЛЕНИЯ

9.1. Адаптивный робот как основной элемент гибкого автоматизированного производства

Больше половины номенклатуры дискретных изделий современного промышленного производства выпускается средними и мелкими партиями. Требования непрерывного совершенствования объектов производства, диктуемое научно-техническим прогрессом, приводят к необходимости частой модернизации изделий, периодической замене ранее выпускаемой продукции новой, обладающей более высокими эксплуатационными качествами. Наблюдается тенденция к расширению номенклатуры и увеличению выпуска более сложных уникальных машин и оборудования, отличающихся большой трудоемкостью изготовления.

Автоматизация многономенклатурного производства традиционными способами, принятыми для крупносерийного и тем более массового выпуска изделий (автоматические линии, связанные фиксированными транспортными средствами конвейерного типа), малоэффективна, а в ряде случаев даже неприемлема. Основные причины такого положения — высокая стоимость, большая трудоемкость и длительность перестройки упомянутых автоматических средств производства, часто сопряженной со значительными капиталовложениями, строительством новых производственных площадей или реконструкцией старых.

Подобные задачи могут быть решены лишь на основе гибких автоматизированных производств (ГАП), что выдвинуло их реализацию в ряд важнейших для народного хозяйства задач. Техническая база решения этой проблемы заложена созданием станков с ЧПУ, промышленных роботов, автоматизированных комплексов типа «обрабатывающий центр», автоматизированных транспортно-складских систем, мобильных транспортных автоматических тележек типа «роботокара» и т. п. Все эти новые средства производства в первую очередь отличает способность к оперативной и простой перестройке работы путем их перепрограммирования, обеспечения системами управления, которые в настоящее время, как правило, строятся на основе вычислительных средств (микроЭВМ, микропроцессоров). Таким образом достигается важнейшее свойство подобных производственных систем: перестраивать свою работу не на основе переналадки посредством перестройки составляющих их физических элементов, а путем изменения информации, поступающей на их системы управления, что в конечном итоге является основным принципом любой автоматизации.

Одну из главных ролей в обеспечении реальной возможности построения гибкого автоматизированного производства, а затем — в возникновении первых действующих ГАП, сыграли адаптивные промышленные роботы, по своей сути обладающие способностью обучаться, т. е. гибко перестраивать свою работу. Роботизированные производства, автоматизация которых основана на применении адаптивных роботов, явились новым существенным шагом к созданию ГАП.

Завод, построенный на основе промышленных роботов, в том числе адаптивных, может выпускать электродвигатели различных размеров, сами промышленные роботы, электроэрозионные станки и малые обрабатывающие центры и другие изделия. Средства производства должны быть организованы в ячейки, состоящие из станков типа «обрабатывающий центр» и промышленных роботов. Могут быть использованы также станки с ЧПУ. В систему должны входить автоматизированный склад и транспортные безрельсовые тележки-автоматы. Производство может управляться центральной системой управления. Подобный завод может работать в три смены при численности обслуживающего персонала 100 человек днем и один человек — ночью.

Автоматическое рациональное функционирование больших и сложных производственных систем невозможно обеспечить путем простого объединения ее отдельных, пусть даже высокоавтоматизированных компонент, таких, как промышленные роботы, обрабатывающие центры и т. п. Важнейшими предпосылками, обеспечивающими слаженную работу всех взаимосвязанных элементов автоматизированного производства, являются структурированная иерархическая система управления, объединенная соответствующим программным обеспечением, технологически адекватная база данных, системно и алгоритмически обусловленное решение вопросов снабжения сырьем и комплектующими материалами, автоматизация процессов контроля, испытаний и аттестации выпускаемых изделий и т. п. Принципиально необходимым условием создания роботизированных ГАП является автоматизация самого процесса получения достаточной информации от окружающей производственной среды и от самой системы, равно как и обработка этой информации для ее использования в управляющих структурах системы.

Важнейшим условием создания роботизированных ГАП является автоматизация измерений всего комплекса производственных параметров, обработки результатов измерений и их ввода в систему управления.

Именно на этой основе и строится адаптивное функционирование автоматизированного производства в зависимости от задания (или его изменения) и различных вариаций окружающих условий (смена оборудования, выход из строя станка или робота и т. п.).

Очевидно, что этим свойством должны в необходимой мере обладать все компоненты роботизированного ГАП и, в первую очередь, входящие в его состав промышленные роботы. Например, обрабатывающее оборудование должно адаптироваться к изменениям разме-

ров заготовки или к износу инструмента таким образом, чтобы это не сказалось на его производительности и качестве работы; промышленные роботы — к изменениям ориентации, размеров или массы переносимых объектов либо к появлению препятствий в их рабочей зоне; системы управления должны адаптироваться к изменению напряжений питания или к выходу из строя той или иной своей компоненты; транспортные роботы-тележки — к изменениям условий их движения, питания и т. п. Наконец, роботизированное ГАП в целом должно адаптироваться к изменениям самого важнейшего своего фактора — объекта производства, что, собственно, и позволяет называть его гибким и автоматизированным. Очевидно, что системы адаптации самих промышленных роботов определяются тем технологическим процессом, в котором они участвуют. Например, роботы для обслуживания оборудования при механической обработке должны обладать адаптацией к размеру захватываемого объекта и к усилиям, возникающим при его взятии и установке. Роботы для механической сборки должны иметь многокомпонентную адаптацию к усилиям и внешнему виду объектов (техническое зрение). Роботам для дуговой сварки требуется адаптация к траектории сварочного шва, реализуемая датчиками касания, локации или технического зрения или индуктивными датчиками.

Таким образом, на основании изложенного выше можно заключить, что первоочередными на пути создания ГАП являются задачи исследований, выделения, классификации и оптимизации производственных параметров, подлежащих измерению, определения диапазонов их измерений, частотных свойств, требуемой точности измерений и т. п. Одновременно необходима разработка эффективных средств и алгоритмов обработки информации и ее ввода в вычислительные системы, управляющие автоматизированным оборудованием и ГАП в целом (причем для каждого уровня управления, естественно, требуется различная степень обработки одних и тех же результатов измерений).

Современная измерительная техника, микроэлектроника и вычислительная техника создали необходимые предпосылки для разработки и внедрения адаптивных производственных систем. С другой стороны, прогрессивное технологическое оборудование и, в первую очередь, промышленные роботы и автоматизированные обрабатывающие комплексы безусловно являются первоочередным объектом практического применения систем технического очувствления и адаптации. В совокупности указанные факторы дают реальные перспективы создания полностью автоматизированных гибкоперестраиваемых производств.

9.2. Развитие систем очувствления и управления

В перспективе номенклатура датчиков для адаптивных роботов должна значительно расшириться. В первую очередь, это диктуется множеством задач, решаемых адаптивными роботами различных

типов для разнообразных технологических процессов и условий эксплуатации. Специальные группы датчиков очувствления должны быть созданы для роботов, эксплуатируемых в условиях воздействия радиоактивных излучений и других специальных сред. Это обусловит использование различных физических принципов получения и преобразования информации, более широкого применения рентгенотелевизионных систем, звуковидения, тепловидения, радиоволновых устройств контроля, телеэндоскопов и в ряде случаев вычислительных томографов с различными физическими принципами действия.

Для массовых технологических процессов (сварки, штамповки, окраски, сборки, контроля качества и др.) будет создано новое поколение средств адаптации с датчиками, имеющими более высокие технические характеристики по надежности, помехоустойчивости, точности, диапазону измеряемых величин с меньшими размерами и массой.

Ожидается создание комплексных датчиков и систем, в которых будут совмещены техническое зрение, локация, силомоментное и тактильное очувствление, на основе унифицированной конструктивной базы и типовых решений при одновременном использовании излучений двух или трех видов или различных диапазонов длин волн электромагнитных и акустических полей.

Перспектива развития датчиков акустической локации заключается в создании локаторов, обладающих возможностью в реальном масштабе времени определять не только дальность, но и основные параметры объектов, такие, как их размеры, внешнюю конфигурацию, шероховатость поверхности, свойства материала объекта (жесткость, плотность) и т. п.

Особое внимание должно быть уделено повышению помехоустойчивости акустических систем адаптации при работе их в реальных условиях.

Наиболее быстрыми темпами будут развиваться датчики технического зрения с использованием полупроводниковых формирователей сигналов изображения. В замкнутых контурах управления адаптивных роботов более широко будут использоваться быстродействующие автоматизированные системы обработки изображения на основе микроЭВМ и микропроцессоров, которые обеспечат адаптацию в реальном масштабе времени. На номенклатуру и структуру датчиков технического зрения существенное влияние оказывают достижения в области оптоэлектроники, вычислительной и телевизионной техники, микроэлектроники, техники средств связи. Дальнейшее совершенствование этих датчиков связано с исследованиями в области динамических характеристик манипуляторов и созданием на их базе более совершенных устройств управления, а также с развитием типовых конструкторских и схемных решений, новых алгоритмов обработки информации.

Наиболее актуальные направления развития средств силоизмерения для роботов связаны с улучшением взаимной развязки реакции силомоментного датчика по координатным осям путем улучшения

конструкций и технологических приемов изготовления упругих элементов, создания специальных электронных устройств и разработки соответствующих алгоритмов обработки информации в широком диапазоне измеряемых сил и моментов.

Создание многокомпонентных датчиков тензорезистивного типа с микроминиатюрными чувствительными элементами из полупроводниковых тонкопленочных материалов, способных работать в экстремальных условиях, позволит существенно расширить динамический диапазон измерений сил и моментов и повысить их точность. Специфика областей применения силомоментных датчиков в ряде случаев исключает возможность использования жестких силоизмерительных устройств и обусловливает создание средств, обладающих свойствами механической податливости. В этом направлении будут применяться магниторезистивные, вихретоковые, радиоволновые и голографические методы, обеспечивающие регистрацию малых перемещений при воздействии сил или моментов. Как правило, функции силомоментных и тактильных измерений будут объединены.

В перспективе системы адаптации должны быть многофункциональными и унифицированными по конструкции, что обеспечит их универсальность.

Затраты на организацию среды и детерминированных условий эксплуатации часто сравнимы со стоимостью самого робота, что определяет практическую необходимость и экономическую целесообразность интенсивного развития средств очувствления и адаптации для роботов на высшем уровне, включая создание соответствующих элементов искусственного интеллекта.

Системы очувствления, основанные на принципах голографии, цифровой пространственной фильтрации, а также искусственные сетчатки на интегральных схемах и волоконной оптике, устройства распознавания речи, анализа тактильной информации с использованием «искусственной кожи» и другие аналоги органов чувств будут находить все большее применение.

Важную роль при разработке эффективных систем очувствления играют бионические принципы. Полезным может оказаться феномен аккомодации, заключающийся в том, что при внезапном изменении стимуляции нервных клеток животного резко возрастает их активность. Если в дальнейшем стимулирующее воздействие не изменяется, то активность нервных клеток падает. Этот принцип лежит в основе выделения контуров объектов, проецируемых на сетчатку глаза, и он может быть реализован на механизмах пространственной дифференциации в системах очувствления роботов.

Согласно закону Вебера — Фехнера, сигнал на выходе нервных клеток прямо пропорционален логарифму величины стимуляции, что позволяет сенсорной системе животных работать в достаточно широком динамическом диапазоне изменения интенсивности входных сигналов.

Уменьшение влияния оптических помех за счет вибрации век глаза также может быть использовано при разработке систем технического зрения. Вибрационный принцип используется в системах

адаптивной фокусировки «телеглаза». Он позволяет осуществлять автоматическую фокусировку без применения линз с изменяющейся геометрией.

Перспективные модели роботов должны работать в несколько раз быстрее, чем человек или роботы первого поколения. В таких условиях обычные устройства сервоуправления приводами могут оказаться неприемлемыми вследствие ухудшения точности, автоколебаний или неустойчивости. Эффективным средством повышения качества управления в условиях неопределенности и дрейфа параметров является самонастройка параметров регулятора исполнительных приводов. Реализация алгоритмов самонастройки возможна на основе организации обратной связи по основным параметрам, в том числе и по ускорению. Для этой цели могут быть использованы, в частности, линейные и угловые акселерометры.

Быстрое развитие робототехники предъявляет повышенные требования к надежности, точности, быстродействию, ресурсу, размерам и стоимости средств очувствления и систем управления. Надежность адаптивных роботов и используемых в них датчиков внешней и внутренней информации должна в несколько раз превышать надежность обслуживаемого ими основного технологического оборудования. Практически это означает, что наработка на отказ у этих датчиков должна составлять многие десятки тысяч часов.

В связи с общим требованием резкого повышения производительности роботов необходимо, чтобы вновь создаваемые системы очувствления и управления отличались высоким быстродействием. Они должны быть также достаточно точными. Соблюдение этого требования особенно важно для сборочных и контрольно-измерительных роботов.

9.3. Развитие искусственного интеллекта роботов

Проблематика адаптивного управления роботами в общем случае не сводится только к автоматическому программированию и осуществлению целенаправленных движений в условиях неопределенности. Наряду с решением этих чисто «двигательных» задач адаптивный робот должен уметь решать и задачи «интеллектуальные». Уже сегодня ощущается реальная потребность в таких элементах искусственного интеллекта, как способность робота обучаться понятиям и распознавать классы сигналов или объектов. Для речевого управления необходимо, чтобы робот мог распознавать отдельные фонемы или команды. В будущем потребуется также, чтобы робот понимал слитную речь и мог идентифицировать речь диктора. Для автономного функционирования в неизвестной обстановке робот должен распознавать препятствия, идентифицировать целевые объекты (например, детали, инструменты) и анализировать окружающую обстановку.

Способность к самообучению и распознаванию является одним из важнейших элементов искусственного интеллекта робота. Среди других элементов искусственного интеллекта можно выделить спо-

собности робота к моделированию внешней среды, логическому анализу производственной обстановки, принятию решений и планированию собственных действий. В процессе функционирования адаптивного робота указанные элементы искусственного интеллекта тесно взаимодействуют и определяют тот или иной режим работы адаптивной системы управления движением, диктуемый особенностями технологического процесса и производственной обстановкой. Робот с элементами искусственного интеллекта принято относить к роботам третьего поколения (интеллектным роботам). Они способны автономно функционировать в сложных условиях, которые могут быть неизвестны и конструктору. Более того, эти условия могут непредсказуемо меняться в процессе выполнения роботом данных ему заданий. Поэтому весьма важное значение приобретают алгоритмические средства обучения и адаптации. Эти средства должны активно использоваться на каждом уровне иерархии системы интеллектного управления. Только в этом случае можно гарантировать, что робот обеспечит выполнение заданных целей в заранее неизвестных и меняющихся условиях.

Чтобы сформулировать роботу задания, человек обычно использует язык команд (директив), представляющий собой упрощенную версию естественного языка. В соответствии с данным роботу заданием на верхнем уровне иерархической системы управления может осуществляться планирование поведения робота и принятие соответствующих решений. Алгоритмы этого уровня (обычно это логические алгоритмы поиска решений) на основе информации, получаемой от системы очувствления и систем нижних уровней иерархии, определяют план действия, который ведет к достижению цели. Далее последовательно принимаются решения об отработке отдельных операций, реализующих «запланированное» поведение робота.

На следующем уровне иерархии осуществляется распознавание сигналов и объектов, а также формирование модели внешней среды. Алгоритмы этого уровня осуществляют обучение робота понятиям распознавания и анализа ситуаций в соответствии с указаниями более высокого уровня. При этом также в значительной степени используется информация, получаемая от системы очувствления. Формируемые роботом сведения обычно реализуются в виде семантических сетей — фреймов, распознающих графов и адаптивных решающих правил. Процесс распознавания сигналов и анализ сцен часто сводится к поиску логического вывода. По мере обучения новым понятиям в памяти робота строится и уточняется модель внешней среды. Эта информационная модель используется далее для проведения «мысленных экспериментов» по выбору того или иного плана поведения робота еще до совершения им реальных действий.

Алгоритмы следующего уровня осуществляют предварительное планирование и построение программных движений исполнительных механизмов робота с учетом конструктивных ограничений и препятствий. Здесь широко используются методы оптимизации на графах и вариационные методы программирования движений.

Наконец, на нижнем уровне синтезируются алгоритмы адаптивного управления приводами исполнительных механизмов, обеспечивающие фактическое осуществление ранее построенного (на более высоком уровне) программного движения при наличии разного рода динамических возмущений, неопределенности или дрейфа параметров.

Все перечисленные уровни иерархии функционально связаны между собой, а также с системой очувствления и с исполнительными механизмами робота. Их согласованная работа обеспечивается специальным коммутатором-координатором. Реализация иерархических систем интеллектного управления невозможна без использования ЭВМ и микропроцессоров. Децентрализованная структура этого управления позволяет осуществлять различные вычислительные процессы параллельно и распределить функции (элементы искусственного интеллекта) между различными ЭВМ и микропроцессорами, что особенно важно с точки зрения управления роботом в реальном масштабе времени.

Важно разработать адаптивные алгоритмы распознавания речевых сигналов и анализа трехмерных сцен, планирования, построения и оптимизации программных движений исполнительных механизмов и управления программным движением. Частично эти алгоритмы могут быть воплощены в модульной системе программ для интеллектного управления транспортными роботами с гусеничным и колесным шасси. К числу элементов искусственного интеллекта, программно реализованных на ЭВМ, можно отнести обработку сенсорной информации, формирование модели среды, прокладку и оптимизацию безопасного маршрута на поверхности с заранее неизвестными препятствиями, построение программного движения самоходного шасси и адаптивное (самонастраивающееся) управление двигателями ведущих колес.

Удельный вес роботов с элементами искусственного интеллекта постоянно должен увеличиваться.

Дальнейшее развитие робототехники в значительной степени будет связано с разработкой эффективных систем очувствления и элементов искусственного интеллекта. Решающее значение при этом приобретает создание соответствующего алгоритмического и программного обеспечения. Появление достаточно мощных и дешевых микроЭВМ и микропроцессоров позволяет не только реализовать адаптивные системы управления и элементы интеллекта роботов, но и делает экономически целесообразным их промышленное использование. Поэтому в недалеком будущем можно ожидать, что адаптивные и интеллектные роботы органически войдут в состав многих ГАП различных отраслей промышленности.

Гибкие автоматизированные системы, включающие промышленные роботы и управляющие ЭВМ, отличаются комплексной автоматизацией не только процесса собственно изготовления продукции, но также и процессов проектирования изделия, подготовки производства и технологических процессов. При этом результат автоматизированного проектирования технологии может передаваться

в цехи («безбумажным» способом) в виде цифровых программ на тех или иных носителях непосредственно в ЭВМ, которые управляют ходом производственного процесса в каждом цехе.

Гибкие производства мыслятся как безлюдные в том смысле, что человек полностью исключается из технологических процессов изготовления деталей, сборки узлов и всего изделия вплоть до процессов контроля, испытаний и выпуска продукции. Человек участвует только в процессах наладки, наблюдения и ремонта.

Создание гибких автоматизированных производств, способных быстро перестраиваться на изготовление новых изделий и освобождающих людей от рутинного ручного труда, имеет колоссальное экономическое и социальное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абакумов В. Г., Фурсик И. А.** Микропроцессорные системы обработки изображений в реальном масштабе времени. Киев: Знание, 1982. 20 с.
2. **Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К.** Распознавание и цифровая обработка изображений. М.: Высшая школа, 1983. 294 с.
3. **Бауман Э.** Измерение сил электрическими методами. Пер. с нем./Под ред. И. И. Смыслова. М.: Мир, 1978. 430 с.
4. **Белянин П. Н.** Промышленные роботы. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
5. **Булгаков А. А.** Программное управление системами машин. М.: Наука, 1980. 264 с.
6. **Вульвет Дж.** Датчики в цифровых системах. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.
7. **Воронов А. А., Чистяков Ю. В.** Аналитические методы выбора технических средств АСУ. М.: Наука, 1976. 355 с.
8. **Гитис Э. Н.** Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. 2-е изд. М.: Энергия, 1970. 390 с.
9. **Гладун В. П.** Эвристический поиск в сложных средах. Киев: Наукова думка, 1977. 270 с.
10. **Горелик А. Л., Скрипник В. А.** Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1977. 184 с.
11. **Гусев А. А.** Адаптивные устройства сборочных машин. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.
12. **Динамика** управления роботами/В. В. Козлов, В. П. Макарычев, А. В. Тимофеев, Е. И. Юревич. М.: Наука, 1983. 216 с.
13. **Дистанционно-управляемые** роботы-манипуляторы. Пер. с англ. и япон. Под ред. Е. П. Попова и М. Б. Игнатьева. М.: Мир, 1976. 460 с.
14. **Дуда Р., Харт П.** Распознование образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976./ 512 с.
15. **Ерош И. Л., Игнатьев М. Б.** Адаптивные системы управления промышленными роботами. М.: НИИмаш, 1976. 64 с.
16. **Завалишин Н. В., Мучник И. Б.** Модели зрительного восприятия и алгоритмы анализа изображений. М.: Наука, 1974. 36 с.
17. **Зотов Ю. К., Тимофеев А. В., Экало Ю. В.** Цифровая адаптация системы управления координатно-измерительным роботом. — В кн.: Станки с ЧПУ, участки и автоматические линии на их основе. М.: МДНТП, 1980. 136 с.
18. **Интегральные роботы.** Сборник статей. Вып. 2. Пер. с англ. и япон./Под ред. Г. Е. Поздняка. М.: Мир, 1975. 76 с.

19. **Иоффе Б. А., Калниньш Р. К.** Ориентирование деталей электромагнитным полем. Рига: Зинатне, 1974. 300 с.

20. **Использование** дальнометрической информации в системе управления мобильным роботом/А. А. Кирильченко, Е. И. Кугушев, А. М. Плотников, В. С. Ярошевский. — В кн.: Проблемы машинного видения в робототехнике. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР, 1981, с. 36—47.

21. **Испытательная** техника. Справочник в 2-х кн./Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1982, 1-я кн. — 528 с., 2-я кн. — 560 с.

22. **Катыс Г. П.** Визуальная информация и зрение роботов. М.: Энергия, 1979. 178 с.

23. **Катыс Г. П.** Оптические информационные системы роботов-манипуляторов. М.: Машиностроение, 1977. 272 с.

24. **Клыков Ю. И.** Ситуационное управление большими системами. М.: Энергия, 1974. 120 с.

25. **Ковалевский В. А.** Методы оптимальных решений в распознавании изображений. М.: Наука, 1976. 328 с.

26. **Козлов В. В., Тимофеев А. В., Юревич Е. И.** Построение и стабилизация программных движений автоматического манипулятора с электрическими приводами. — В кн.: Робототехника. Л.: ЛПИ, 1979, с. 76—86.

27. **Костюк В. И., Ямпольский Л. С., Иваненко И. Б.** Промышленные роботы в сборочном производстве. Киев: Техника, 1983. 184 с.

28. **Кузнецов М. М., Волчкевич Л. И., Замчалов Ю. П.** Автоматизация производственных процессов. М.: Высшая школа, 1978. 432 с.

29. **Малые** ЭВМ и их применение/Под общ. ред. Б. Н. Наумова. М.: Статистика, 1980. 231 с.

30. **Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С.** Системы управления манипуляционных роботов. М.: Наука, 1978. 154 с.

31. **Мещеряков А. Ю.** Фотоэлектронная система распознавания движущихся деталей. — Механизация и автоматизация производства, 1981, № 8, с. 11—12.

32. **Мясников В. А., Игнатьев М. Б., Покровский А. М.** Программное управление оборудованием. Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1974. 543 с.

33. **Мячев А. А.** Организация управляющих вычислительных комплексов. М.: Энергия, 1980. 164 с.

34. **Павловский В. Е.** Процессы реального времени в системе управления роботом. — В кн.: Управления робототехническими системами и их очувствление. М.: Наука, 1983, с. 134—142.

35. **Пол Р.** Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. М.: Наука, 1976. 208 с.

36. **Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л.** Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. 416 с.

37. **Попов Е. П., Тимофеев А. В.** Принцип скоростного управления в задаче аналитического синтеза автоматов стабилизации. — ДАН СССР, 1981, т. 256, № 5, с. 1073—1076.

38. **Пособие** по применению промышленных роботов. Пер. с япон./Под ред. П. Н. Белянина, Б. Ш. Розина, В. Н. Данилевского. М.: Мир: 1975. 449 с.

39. **Пособие** по применению промышленных роботов/Под ред. Кацухико Нода. М.: Мир, 1975. 451 с.

40. **Потапьевский А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение, 1974. 240 с.

41. **Приборы** для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник в 2-х кн./Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1976, 1 кн. — 392 с., 2 кн. — 327 с.

42. **Приборы** и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. Т. 1/Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1978. 448 с.

43. **Проблемы** машинного видения/Под ред. Д. Е. Охоцимского. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР, 1981, с. 120—132, 140.

44. **Проектирование** датчиков для измерения механических величин/Под ред. Е. П. Осадчего. М.: Машиностроение, 1979. 480 с.

45. **Пряничников В. Е.** Средства машинной графики для анализа пространственных движений роботов. — В кн.: Механика и управление движением роботов с эле-

ментами искусственного интеллекта. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша АН СССР, 1980, с. 72—85.

46. **Рафаэль Б.** Думающий компьютер. М.: Мир, 1979. 408 с.

47. **Сборка** и монтаж изделий машиностроения: Справочник. Т. 1/Под ред. В. С. Корсакова. М.: Машиностроение, 1983. 480 с.

48. **Скорописов Ю. И.** Автоматизированное управление грузопотоками конвейерно-складских комплексов. — В кн.: Автоматизированные транспортно-складские системы на промышленных предприятиях. Л.: ЛДНТП, 1982, с. 4—7.

49. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением/Под ред. Б. Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.

50. **Тимофеев А. В.** Адаптивное управление робототехническими системами на базе микропроцессоров и микроЭВМ. — В кн.: Системы управления роботов на базе микропроцессоров. М.: Наука, 1983, с. 1—172.

51. **Тимофеев А. В.** Построение адаптивных систем управления программным движением. Л.: Энергия, 1980. 88 с.

52. **Тимофеев А. В.** Принципы и алгоритмы построения адаптивных систем управления роботов. — В кн.: Робототехника. Л.: ЛПИ, 1977, с. 35—43.

53. **Тимофеев А. В.** *Роботы и искусственный интеллект.* М.: Наука, 1978. 192 с.

54. **Трофимов А. И.** Пьезоэлектрические преобразователи статических нагрузок. М.: Машиностроение, 1979. 130 с.

55. **Управление** роботами от ЭВМ/Е. И. Юревич, С. И. Новаченко, В. А. Павлов и др.; Под ред. Е. И. Юревича. Л.: Энергия, 1980. 264 с.

56. **Фомин А. В.** Основные направления развития сборочного производства за рубежом. — Автомобильная промышленность, 1980, № 7, с. 32—33.

57. **Фотоэлектрические** преобразователи информации/Под ред. Л. Н. Преснухина. М.: Машиностроение, 1974. 376 с.

58. **Чвертко А. И., Патон В. Е., Тимченко В. А.** Оборудование для механизированной дуговой сварки и наплавки. М.: Машиностроение, 1981. 264 с.

59. **Юревич Е. И.** Перспективы разработки и применения промышленных роботов. — В кн.: Научные проблемы робототехники. М.: Наука, 1980, с. 83—89.

60. **Янг Дж. Ф.** Робототехника. Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1979. 300 с.

61. **Яхимович В. А.** Ориентирующие механизмы сборочных автоматов. М.: Машиностроение, 1975. 116 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Алгоритм вычисления параметров положения объекта 113—115
— дискретизации изображений 102, 103
— идентификации и классификации изображений 111—113
— обработки изображений 102—120
— — — дифференциальный 106—108
— — — — выделения признаков изображений 108—111
— — — — вычисления нормы градиента 106—108, вычислительная схема Собела 107, многошаговый 107, 108, оператор Робертса 107
— — — интегральный 104—106
— — — — дискретное преобразование Фурье 105, 106
— — — — преобразование Адамара 106
— — — — преобразование Уолша 106
— — — от сканирующего дальномера 115—120
— управления с вычислением проходов 116, 117
— фильтрации шкалы препятствий 116
— — шумов 103, 104
— — —, анизотропный 103
— — —, пороговый 103
— — — , рекуррентный 104
Архитектура адаптивных робототехнических систем 9—13

Б

Блок анализа сцен 24
— информации 24
— символического представления 24

В

Видеодатчик 81, 89—94
—, диссектор 89, 90
—, прибор с зарядовой связью 90—93
—, способ сопряжения с микроЭВМ 88, 89
— фотоэлектрический 93, 94

Г

Гибкая производственная система 193
— — — для радиоэлектронной промышленности 193, 194
Гибкое автоматизированное производство (ГАП) 9, 241—243, 249
Гистограмма яркости изображения 105
Граф конечного автомата 144, 145
— оптимальный распознающий 226—228
— переходов 147, 148
— формирования признака 119

Д

Данные системы очувствления, типы 154, 155
Датчик локационный 56—80
— — акустический 58—64
— — — по эхометоду 58
— — — по методу, основанному на эффекте Допплера 58
— — — ультразвуковой 60—64
— —, классификация 56—58
— — оптический 64—70
— — —, компоновка оптических преобразователей 66
— — — лазерный 67—70
— — —, схема сканирования объекта 67
— — пневматический 78—80
— — —, используемые гидрогазодинамические эффекты 78
— — —, типы преобразователей 78
— — радиационный 76, 77
— — —, группы 76
— — —, детекторы 77
— — электромагнитный 70—75
— силомоментного очувствления 29, 35—48
— — — кварцевый 32
— — — магнитоупругий со скрещенными обмотками 35
— — — многокомпонентный 35—48
— — —, принципы измерения сил 29
— — — пьезоэлектрический трансформаторный 33, составной, 34, трехкомпонентный 44, 45
— — — пятикомпонентный 44
— — — с емкостными чувствительными элементами 35
— — — с оптическими чувствительными элементами 35
— — — с полупроводниковыми тензорезисторами 30, 31
— — — с проводниковыми (фольговыми) тензорезисторами 30, 31
— — — с пьезоэлектрическими чувствительными элементами 32—34
— — — с электромагнитными чувствительными элементами 34
— тактильного очувствления 29, 48—55
— — — многофункциональный 54, 55
— — —, принципы измерения сил 29
— — — с емкостными чувствительными элементами 35
— — — с оптическими чувствительными элементами 35
— — — с полупроводниковыми тензорезисторами 30, 31
— — — с проводниковыми (фольговыми) тензорезисторами 30, 31
— — — с пьезоэлектрическими чувствительными элементами 32—34
— — — с электромагнитными чувствительными элементами 34
Дерево распознавания 112, 113
Диаграмма фильтрации шкалы препятствий 115, 116
Дискретизация изображения 102, 103
Диссектор 89, 90

И

Информационная поверхность 62
Информационное поле 61, 69
— — для системы технического зрения 118
Искусственный интеллект роботов 10
— — —, перспективы развития 246—249
Исполнительный механизм адаптивного робота 11, 12

К

Калибровка систем технического зрения 86, 87
Комплекс робототехнический адаптивный 152—158
— — —, логическое управление 152—158
Конечный автомат 143—152
— — Мили 143, 144
— — Мура 143
— — стохастический 155
Коррекция положения горелки относительно изделия 180, 181

Л

Логическое управление адаптивным роботом 143—152
— — — робототехническим комплексом 152—157
— —, реализация 158—162

М

Макет внутрицехового транспортного робота с ультразвуковым дальномером 62, 63
Макрооператор (макрос) 169, 170
Манипулятор 11
— промышленного робота «Puma» фирмы «Юнимейшн» (США) 11, 12
— сборочного робота RSI фирмы «Ай-би-эм» (США) 12
— с сервоприводом 150
— — «обученный» 151
— цикловый 145—148
— —, управление 148—150
Математическое обеспечение адаптивных роботов уровни 20
Матрица датчика касания 50
— на приборах с зарядовой связью 91—93
— отсчетов градаций яркости 82
— пропорциональная тактильная 51, 52
— фотоприемная 93
Метод адаптации 176—182
— — геометрический 176—182
— — — совмещения 178, 179
— — — — комбинированный 178, 179
— — — — путем непрограммируемых поисковых движений 178, 179
— — — — путем прерывания отработки программируемых поисковых движений 178, 179
— — технологический 176
— идентификации изображений 111—120
— — — корреляционный 113
— — — путем построения графов решений 112
— — — путем прямого сравнения с эталоном 111, 112
— фильтрации шумов 103, 104
— — — анизотропный 103, 104
— — — пороговый 103
— — — рекуррентный 104
Многоцелевой инструментальный комплекс 170—172
Моделирование роботов имитационное 27
Модель, градация 26
— проблемно-ориентированной среды 22—28
— — — — второго уровня 24
— — — —, группы 25
— — — —, классификация 25—28
— — — — многоградационная 26
— — — — первого уровня 24
— — — — редукционная 25, 26
— — — — ситуационная 26
— — — — теоретико-графовая 25
— — — — третьего уровня 24
Мультизадачность 20, 21, 128, 129

Н

Надежность адаптивных роботов 246

О

Объект манипулирования, характеристика 13
Оператор Робертса 107
Операционная система проблемно-ориентированная 20, 164
— —, структура 163, 164

П

Принципы восприятия адаптивных роботов 13—17
— измерения сил в силомоментных и тактильных датчиках 29—35
— обработки информации 13—22
— построения систем технического зрения 81—89
— — — управления адаптивных роботов 13—22, 121—125
Программа, моделирующая работу конечного автомата 160, 161
Программное обеспечение адаптивных роботов 19—21, 125—142
— — — —, инструментальные средства разработки и исследования 162—172
Процесс сварочный, особенности 173

Р

Регулятор циклового манипулятора 148—149
Робот промышленный 7, 10
— — адаптивный 7, 9, 10, 11, 19
— — — для адресования деталей на конвейере 223—230
— — — для вспомогательных операций 214—240
— — — для дуговой сварки 173—192, методы адаптации 176—182, особенности 173—176, технические средства адаптации 182—192
— — — для участков механической обработки 214—217
— — — для участков штамповки 217—223
— — — контрольно-измерительный 230—240
— — — манипулятор 7, 11
— — — математическое (программное) обеспечение 19—21

— — —, области применения 11
— — —, общая схема 11
— — — перспективы развития 241—243
— — —, принципы построения 9
— — — сборочный 193—213
— — — — многооперационный 205—213
— — — — с силомоментным очувствлением 200—205
— — —, система управления 18
— — —, среда функционирования 12, 13
Роботизированный технологический комплекс неразрушающего контроля 235—240
Робототехническая система адаптивная 9
— —, архитектура 9
— — для многооперационной сборки 205—213
Робототехнический комплекс адаптивный 152—156
— — —, управление 152—156
— — исследовательский инструментальный 163—170
— — — — многоцелевой 170—172
— — конвейерно-складской 223—230

С

Сварочная дуга как датчик расстояния до поверхности свариваемых элементов 187, 192
Сеть семантическая 27
Система операционная 20, 128
— — EHOS 134
— — проблемно-ориентированная 20, 164
— очувствления 7, 10, 11, 13, 14, 17
— —, перспективы развития 243—246
— программирования 130—142
— — AL 133, 134
— — VAL 138—141
— — WAVE 133
— технического зрения 10, 15, 16, 81—120
— — —, алгоритм обработки изображений 102—120
— — —, видеодатчик 81, 89—94, видикон 90, диссектор 89, 90, приборы с зарядовой связью 90—93, фотоэлектрический 93, 94
— — — для экстремальных условий 98—102, акустическая 101, 102, радиационная 98, 99, радиоволновая 100, 101, тепловая 99, 100
— — —, калибровка 86, 87
— — —, основные параметры 84—86
— — —, основные принципы и способы построения 81—89
— — —, основные требования 84
— — —, режимы работы 86, 87
— — —, состав и устройство 87, 88
— — — телевизионная 95—98
— управления адаптивных роботов 18, 121—172
— — — — , иерархия 18, 121, 122
— — — — логическая 143—162
— — — — многоуровневая 129, 193
— — — —, перспективы развития 243—246
— — — —, принципы построения 121—125
— — — —, программное обеспечение 125—142
— — — —, режимы работы 129
— — — —, структура 126
— — — —, ядро 19
Среда функционирования адаптивного промышленного робота, организация 12, 13
Средства очувствления адаптивных роботов 14
— — — —, типы 15
Станок с ЧПУ 214
Схема вычислительная Собела 107
— определения положения линии таврового соединения 189
— поиска базовых точек для сварки изнутри в углах 188

Т

Тепловизор, принцип действия 100
Томограф радиационный вычислительный 99

У

Управление манипулятором с сервоприводом 150—152
— логическое 152—158
— —, реализация 158—162
— цикловым манипулятором 148—150
Устройство непрерывного прямого копирования для адаптации 184, 185
— периодического прямого копирования для текущей адаптации 184

Ч

Числовое программное управление 214—217
Число градаций яркости сигнала 84, 85

Ш

Шум, метод фильтрации 103, 104, анизотропный 103, 104, геометрический 104, пороговый 103, рекуррентный 104

Щ

Щуп измерительный **230, 231**

Э

Эффект Мессбауера 77

Я

Язык программирования роботов **21**, 22, 130—142
— — — AL 133, 134, 141, 142
— — — ALFA 137, 138
— — — AML 136, 141, 142
— — — C 131
— — — HELP 137, 141, 142
— — — JARS 136, 141, 142
— — — MCL 137, 141, 142
— — — PLAW 22, 137, 138
— — — ROBEX 137
— — — РОКОЛ 135
— — — RPL 136, 141, 142
— — — VAL 22, 138, 141, 142
— — — ЯРС 135